



Mai.
2020

TRANSITION INDUSTRIELLE - PROSPECTIVE ENERGIE MATIERE : VERS UN OUTIL DE MODELISATION DES NIVEAUX DE PRODUCTION

RAPPORT

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

En partenariat avec :



REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les membres du Comité de Pilotage et les nombreux contributeurs des travaux présentés dans ce rapport :

Guillaume DAILL (ADEME)
Philippe LEONARDON (ADEME)
Monique COIGNARD (ADEME)
Fabrice COPIN (ATILH)
Arnaud PERIGORD (A3M)
Stéphane CHATELIN (Association négaWatt)
Stéphane BERGER (DGE)

Ainsi que tous les participants industriels, académiques, représentants de fédérations ou de l'administration au séminaire de travail du 21 septembre 2018

CITATION DE CE RAPPORT

Emmanuel RAUZIER (Institut négaWatt), Benoît VERZAT (Institut négaWatt), Thomas LETZ (Institut négaWatt), Thierry RIESER (ENERTECH), Simon METIVIER (Solagro), Stéphane MOTEAU (ENERTECH), Camille JULIEN (ENERTECH) : **2019 TRANSITION INDUSTRIELLE - PROSPECTIVE ENERGIE MATIERE : VERS UN OUTIL DE MODELISATION DES NIVEAUX DE PRODUCTION**, 155 pages

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

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

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01
Numéro de contrat : 18MAR000293

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : Institut négaWatt, Enertech, Solagro

Coordination technique - ADEME : DAILL Guillaume
Direction/Service : DETI/SI

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	6
ABSTRACT	8
1. Contexte et objectifs	10
2. Description du modèle	11
2.1. Modélisation de la demande	11
2.2. Cartographie des flux	12
2.3. Paramètres du modèle	14
3. Limites du modèle et perspectives	15
3.1. Incertitudes statistiques, VA et quantité	15
3.1.1. Unité de nombre	15
3.1.2. Unité de masse	15
3.1.3. Unité de valeur	15
3.1.4. Approches retenues dans l'étude	15
3.2. Limites en termes de périmètre	16
3.2.1. Seuls neuf matériaux sont analysés	16
3.2.2. Certains biens d'équipements et de consommation non pris en compte	16
3.3. Stocks de matériaux et anomalies de l'année de référence	16
3.3.1. Représentativité de l'année de référence	16
3.3.2. Stock de matériaux intermédiaires et primaires	16
3.3.3. Variation des immobilisation matière dans les BEC & gisement de déchets	16
3.4. Imports, exports et solde net	16
3.5. Synthèse des perspectives d'amélioration	17
Annexes	18
4. Recyclage : définitions méthodologiques et influence sur l'étude	19
5. Données sur les biens d'équipements et de consommations	21
5.1. Mécanique, électricité, textile, divers	22
5.1.1. Le secteur de la mécanique	22
5.1.2. Le secteur de l'électricité et de l'électronique	23
5.1.3. Le secteur du textile et de l'habillement	24
5.1.4. Le secteur des biens divers	25
5.2. Produits chimiques de consommation	27
5.2.1. Les engrais	27
5.2.2. Les phytosanitaires	27
5.2.3. Les détergents, les solvants et les produits d'entretien	28
5.2.4. Les peintures, colles, encres et autres	28
5.2.5. La pharmacie	28
5.3. Les emballages	29
5.3.1. Les emballages en acier	32
5.3.2. Les emballages en aluminium	32
5.3.3. Les emballages en bois	32
5.3.4. Les emballages en papier et en carton	32
5.3.5. Les emballages en plastiques	33



5.3.6.	Les emballages en verre	35
5.4.	BTP.....	36
5.4.1.	Bâtiment - Construction neuve	36
5.4.2.	Bâtiment – Rénovation	44
5.4.3.	Travaux publics.....	49
5.5.	Production d'énergie.....	53
5.5.1.	L'éolien.....	54
5.5.2.	Le photovoltaïque	55
5.5.3.	La méthanisation.....	56
5.6.	Transport.....	58
5.6.1.	Granulométrie et paramètres pris en compte	58
5.6.2.	Données considérées	59
5.6.3.	Eléments de prospective	60
6.	Données sur les matériaux	64
6.1.	L'acier.....	64
6.1.1.	Description du/des procédés	64
6.1.2.	Situation actuelle.....	65
6.1.3.	Eléments de prospective pour l'acier.....	67
6.2.	L'aluminium	70
6.2.1.	Description des procédés	70
6.2.2.	Situation actuelle.....	71
6.2.3.	Eléments de prospective	72
6.3.	Le clinker.....	74
6.3.1.	Description du/des procédés	74
6.3.2.	Situation actuelle.....	74
6.3.3.	Eléments de prospective	77
6.4.	Le verre	80
6.4.1.	Description des procédés	80
6.4.2.	Situation actuelle.....	82
6.4.3.	Eléments de prospective	84
6.5.	Préambule sur le secteur de la chimie.....	85
6.6.	L'éthylène et les bases de la chimie organique	87
6.6.1.	Description des procédés	87
6.6.2.	Situation actuelle.....	87
6.6.3.	Eléments de prospective sur la chimie organique	97
6.7.	Les plastiques	99
6.7.1.	Description des procédés	99
6.7.2.	Situation actuelle.....	102
6.7.3.	Eléments de prospective	107
6.8.	Le dichlore (Cl₂)	110
6.8.1.	Description des procédés	110
6.8.2.	Situation actuelle.....	111
6.8.3.	Eléments de prospective	113
6.9.	L'ammoniac	115
6.9.1.	Description du/des procédés	115
6.9.2.	Situation actuelle.....	116
6.9.3.	Eléments de prospective	120
6.10.	Les Papier-Cartons	125
6.10.1.	Description du/des procédés.....	125
6.10.2.	Situation actuelle	125
6.10.3.	Demande	128
6.10.4.	Prospective pour le papier	132

6.11. Le sucre	135
6.11.1. Description du procédé	135
6.11.2. Situation actuelle	136
6.11.3. Eléments de prospective	137
7. Liste des paramètres du modèle	139
8. Références bibliographiques	144
9. Index des tableaux et figures	147
10. Sigles et acronymes	152
11. Liste des experts ayant contribué à la cartographie de référence	153



RÉSUMÉ

Afin d'éclairer les débats autour de la transition énergétique et environnementale, l'ADEME propose depuis plusieurs années un scénario permettant d'imaginer à horizon 2050, la trajectoire de la demande en énergie et le mix énergétique des grands secteurs consommateurs d'énergie que sont le transport, le bâtiment, l'agriculture et l'industrie.

Pour le secteur industriel, les deux principaux déterminants de la demande en énergie sont les niveaux de production et le niveau d'efficacité énergétique. A ce jour si les perspectives d'évolution de l'efficacité énergétique dans l'industrie sont relativement bien documentées, les projections sur les niveaux de production de l'industrie française sont plus hasardeuses.

L'ADEME a donc souhaité se doter d'un outil de modélisation des niveaux de production industrielle au travers de la demande en matériaux produits par les 9 industries grandes consommatrices d'énergie que sont les industries de l'acier, l'aluminium, le clinker, le verre, le dichlore, l'ammoniac, l'éthylène, les papiers et cartons et le sucre. L'objectif est de prendre en compte l'évolution des marchés de ces secteurs, avec notamment un focus sur ceux impactés par la Transition Energétique. Dans ce modèle, les 6 catégories de marchés identifiées sont les suivantes : (1) Mécanique, électricité, textile, divers., (2) Produits chimiques (3) Emballages, (4) BTP, (5) Production d'énergie, (6) Transport.

L'apport méthodologique de ces travaux est constitué par deux éléments clés jusqu'à présent rarement modélisés conjointement :

1. Une quantification de la production et de la consommation de 9 matériaux bruts ainsi que des biens de consommations et d'équipement (intermédiaires ou finaux) créés à partir de ces matériaux. Cette quantification intègre notamment les dimensions d'import et d'export ainsi que le recyclage. Cette quantification a été faite pour l'année 2014 à partir d'une analyse recoupant les principales sources de données nationales ou internationales et est schématisée dans une représentation matricielle de type « tableau entrée-sortie ».
2. Une modélisation des trajectoires de production pour les 9 matériaux étudiés, à partir de ce point de référence moyennant la formulation d'hypothèses associées aux 6 marchés. Celles-ci concernent l'évolution de la demande des consommateurs, de la réutilisation et réparation éventuelle de certains produits, des améliorations technologiques du bilan matière, du taux d'incorporation de matière recyclée dans la fabrication mais aussi de l'évolution des échanges internationaux.

Cette synthèse résume les principes méthodologiques retenus. Pour favoriser la mise à disposition de ces travaux pour le grand nombre, les données 2014 sont disponible sous format Excel et un rapport détaille les sources de données utilisées. Ce dernier contient également quelques pistes en vue d'identifier les déterminants essentiels à l'évolution de la production des différents matériaux que se soient du point de vue technologique, en termes de marchés, voire de relocalisation.

A ce stade de réflexion, les considérations prospectives formulées dans ces documents ont pour objet de susciter les échanges entre les différentes parties prenantes et l'ADEME. Elles ne présument en rien des hypothèses qui seront retenues ultérieurement dans le cadre de l'élaboration de nouveaux scénarios prospectifs établis par l'ADEME, mais elles s'appuient sur des ordres de grandeur objectivés et reconnus par le travail de recoupement des sources de données nécessaires à l'établissement des données de référence 2014.

Par ailleurs, ces travaux (incluant les outils correspondants) sont à disposition (sur demande à l'adresse mail : transition.industrie@ademe.fr) de toute entité désirant construire ses propres modélisations de la production industrielle en lien avec les enjeux de transition énergétique et de décarbonation de l'Industrie.

L'ADEME reste ainsi à l'écoute de toute proposition d'évolution d'amélioration de ces premiers éléments pour une meilleure appropriation des enjeux par l'ensemble des parties prenantes. En effet, au regard de la production constante de données ou études sur ces sujets, certaines sources ou références n'ont pas forcément pu être intégrées dans les délais de production de ces travaux. Ainsi l'Agence compte poursuivre le développement de cet outil en intégrant de nouveaux matériaux, mais aussi en renforçant la modélisation des évolutions de marchés pour y intégrer plus structurellement le concept de substitutions entre matériaux, ou les approches en valeur ajoutée plutôt qu'en volume.

Avertissement au lecteur

La présente étude a permis de confronter différentes sources bibliographiques en croisant notamment des données « bottom-up » (par exemple ACV liées au marché) et des données « top-down » (par exemple, niveau de production sur un secteur). Certains choix méthodologiques ont été opérés pour assurer une cohérence globale afin de ne pas remettre en cause significativement les sources d'information institutionnelles.

Une structure homogène du chapitrage a permis de traiter les paramètres clés de chaque secteur/marché. Cependant, la diversité des informations collectées ainsi que les différences de complexité de chaque secteur/marché n'a pas permis de pousser au même niveau de profondeur toutes les analyses. Le choix a été fait de consigner un maximum d'informations et explique ainsi certains déséquilibres dans les chapitres.



ABSTRACT

For a few years, with the aim of facilitating discussions about the energy and environmental transition, ADEME has been suggesting a scenario imagining the way the energy demand and energy mix from the major energy-consuming sectors (transport, building, agriculture, and industry) are going to follow by 2050.

In the industrial sector, the two main factors of the energy demand are: the output levels and the energy efficiency level. Until now, the development prospects of the industrial energy efficiency are relatively well documented, but the production level projections for the French industry are more uncertain.

That is why ADEME wanted to get equipped with a modelling tool for the industrial production levels through the demand for materials produced by the following 9 energy-consuming industries: steel, aluminum, clinker, glass, chlorine, ammonia, ethylene, papers and cardboards, and sugar. The aim is to take into account the market changes of these sectors, particularly focusing on the ones that are impacted by the energy transition. In this model, the 6 identified market categories are: (1) Mechanics, electricity, textile, miscellaneous, (2) Chemical products, (3) Packings, (4) Construction industry, (5) Energy production, (6) Transport.

The methodological contribution of these works comprises two key elements, that were hardly ever jointly modelled until today:

1. Quantifying the production and consumption of 9 raw materials, as well as of consumer goods and capital goods (intermediate or end products) created from these materials. This quantification includes, among other elements, the import and export dimensions, as well as the recycling process. This quantification was made for the year 2014 from an analysis that cross-checked the main national or international data sources, and it is outlined in an “input-output table” type matrix representation.
2. Modelling the production paths for the 9 materials studied, from this reference point and formulating assumptions related to the 6 markets. They concern the changing consumer demand, reuse and possible repair of some goods, technological improvements of material balance, incorporation rate of recycled material in manufacturing, but also trends in international trade.

This synthesis summarizes the methodological principles selected. In order to make these works available to a wider audience, 2014 data are available in Excel format and a report details the data sources used. This report also contains some analysis on the critical factors needed for the development of the production of the different materials, whether from a technological point of view, in terms of market, or even relocation.

At this point in our analysis, forward-looking considerations expressed in these documents aim at promoting exchanges between the different stakeholders and ADEME. They might not be the assumptions that will be retained later on as part of the new prospective scenarios proposed by ADEME, but they rely on orders of magnitude objectified and acknowledged through the cross-checking work of the data sources needed to establish reference data for 2014.

Moreover, these works (including the related tools) are available (on request, at transition.industrie@ademe.fr) to every entity willing to build its own modellings of the industrial production in regard to the issues at stake with the energy transition and the decarbonation of the industry.

ADEME remains attentive to any suggestion of change or improvement of these first elements, so that the stakeholders better understand what is at stake. Indeed, in view of the steady supply of data and studies related to these matters, some of these sources or references could not be integrated to the production schedules. Thus ADEME intends to continue to develop this tool by integrating new materials, but also by improving the modelling of the market developments in order to integrate concepts such as material replacements, or added-value approach instead of volume approach, in a more structural manner.

Note to the reader

This study was used to compare several bibliographic sources by combining “bottom-up” data (for example, LCA of key products) and “top-down” data (for example, production level on a sector). Some methodological choices were made in order to ensure overall consistency, thus avoiding to question institutional information sources too much.

A homogeneous structure was used to handle the key parameters for each sector/market. However, the diversity of the collected data, as well as the complexity of each sector/market, put a brake on the analysis depth. We chose to record as much information as possible, which explains why certain chapters may look uneven.



1. Contexte et objectifs

Afin d'éclairer les débats autour de la transition énergétique et environnementale, l'ADEME propose depuis plusieurs années un scénario prospectif permettant d'imaginer à horizon 2050 la trajectoire de la demande en énergie et le mix énergétique des grands secteurs consommateurs que sont le transport, le bâtiment, l'agriculture et l'industrie.

Pour le secteur industriel, les deux déterminants de la demande en énergie sont les niveaux de production et les consommations spécifiques. Si les perspectives d'évolution des consommations spécifiques dans l'industrie sont relativement bien documentées, les projections sur les niveaux de production de l'industrie française à un horizon aussi lointain le sont moins. Au-delà de ce manque de visibilité sur la production industrielle, les hypothèses formulées sur ce paramètre (souvent liées à une évolution du PIB), ne tiennent pas comptes des hypothèses formulées sur les secteurs consommateurs. Par exemple, une hypothèse formulée sur un taux de rénovation de logement n'a pas d'impact sur les niveaux de production de laine de verre ou de vitrage.

Dans le cadre d'un travail de **mise à jour de cet exercice prospectif en 2020, l'ADEME souhaite renforcer ses estimations de la consommation énergétique de l'industrie en modélisant l'articulation de la production industrielle avec les évolutions de la consommation en matériaux des autres secteurs** notamment ceux dont une part des évolutions peuvent être en lien avec les enjeux de la Transition Energétique (bâtiment, transport, alimentation).

En première approche, et en raison de leurs impacts énergétiques à la production, 9 matériaux sont particulièrement visés : l'acier, l'aluminium, le clinker, le verre, les papiers cartons, l'éthylène, l'ammoniac, le dichlore et le sucre. Ces neuf secteurs industriels représentent plus de 50 % de la consommation énergétique de l'industrie et moyennant l'établissement d'hypothèses sur les consommations énergétiques unitaires à la production de ces différents produits, en ayant connaissance des niveaux de production sur le territoire métropolitain, il est possible d'en déduire les consommations énergétiques du secteur.

Les travaux engagés dans le cadre de cet exercice visent plusieurs objectifs :

- Objectiver les débats quant aux niveaux de production industriels à considérer dans les exercices prospectifs, ceux-ci dépassant le simple cadre de la Transition Energétique et Ecologique, pour toucher le sujet de la politique industrielle,
- Instaurer un espace de dialogue avec les industriels quant aux impacts de la TEE sur les capacités de production,
- Mettre en cohérence les niveaux de productions industriels avec les hypothèses formulées sur les évolutions des secteurs consommateurs de ces matériaux
- Développer un outil modélisant les niveaux de production des 9 matériaux considérés sur la période 2015-2050 compte tenu :
 - o Des hypothèses formulées sur les secteurs/marchés débouchés de ces matériaux
 - o Des hypothèses liées au recyclage de ces matériaux ou des produits constitués de ces matériaux,
 - o Des équilibres d'importation et d'exportation.

Ce document décrit les grandes lignes méthodologiques des deux derniers points, les deux premiers objectifs étant exogènes à l'outil.

Le rapport en détaille les différentes hypothèses, autour de chacun des matériaux IGCE et aux différents marchés ou sous-marchés de la demande.

2. Description du modèle

Usuellement, dans les travaux de prospective, les niveaux de production sont considérés comme proportionnels au PIB, mais cette approche présente plusieurs inconvénients. Le premier est de considérer que la part de l'industrie dans la contribution au PIB reste constante. Sur des horizons de temps de plusieurs dizaines d'années, cette assertion est discutable notamment car elle n'intègre pas d'évolution sur la valeur ajoutée pour un matériau donné. La seconde est que cette approche ne permet pas de mettre en avant des effets de substitution d'un matériau par un autre, et ainsi de ne pas être en capacité de chiffrer les impacts environnements de tels changements.

C'est pourquoi, l'outil développé vise à modéliser les quantités produites en France des 9 principaux matériaux consommateurs d'énergie indépendamment du niveau de PIB. Schématiquement l'outil cherche d'abord à partir d'un jeu d'hypothèses donné à déterminer le niveau de demande en matériaux dans les différents secteurs débouchés. Dans un second temps, sur la base d'hypothèse en lien avec le recyclage et la localisation de la production, ce niveau de demande est traduit en niveau de production. Cette modélisation de la demande est effectuée par pas annuel entre 2014, année de référence sur laquelle toutes les données ont été consolidées, et 2050.

Ce court descriptif du fonctionnement général de l'outil pose néanmoins les éléments indispensables de sa conception et qu'il a fallu traiter lors du développement de l'outil :

- La modélisation de la demande,
- La cartographie des flux, ou quel secteur consomme quel matériau ?
- Les niveaux d'importations et d'exportations, retranscrits en solde net
- Les autres paramètres déterminants à prendre en compte pour proposer une modélisation, notamment sur les évolutions de la demande en quantité, ou qualité.

Ces différents points sont développés dans les paragraphes suivants.

2.1. Modélisation de la demande

Les biens de consommation et d'équipement désignent l'ensemble des marchandises qui à l'issue d'un circuit de distribution et de vente, sont accessibles aux ménages ou aux entreprises. La demande en matériaux correspondant à l'ensemble des secteurs consommant des produits finis constitués d'un ou de plusieurs des 9 matériaux. La segmentation de la demande est particulièrement ardue. En effet celle-ci est liée à la liste des matériaux étudiés, aux différents sous-secteurs débouchés de ces matériaux, aux données statistiques disponibles et aux hypothèses formulées.

Ainsi, il est impossible de représenter une segmentation fine de tous les sous-secteurs pour l'ensemble des matériaux en raison du manque de données disponibles. La demande en matériaux des biens de consommation et d'équipement (BEC) est donc découpée au travers de 6 principaux secteurs, eux même subdivisés autant que possible en sous-secteurs :

1. Mécanique, électricité, électronique, textile, divers,
2. Produits chimiques : engrais azotés, autres engrais, produits d'entretien, peintures colles vernis, Phytosanitaires, Pharmacie, Produits réactifs pour les IAA, la sidérurgie, la métallurgie, les papiers-cartons, le verre, les engrais, etc.
3. Emballages en acier, aluminium, verre, papier-cartons, bois, plastiques
4. BTP : Bâtiments neufs, rénovation bâtiments, Ouvrages d'art, Réseau ferré, Voirie
5. Production d'énergie : éolien, photovoltaïque, méthanisation
6. Transport.: transport terrestre, autres transports

Il faut noter que sur le secteur de l'énergie, la demande en matériaux du parc nucléaire n'est pas modélisée. En effet, il a été impossible lors du développement de cet outil d'obtenir des informations sur la demande en matériaux de ce secteur. La demande en matériau du parc nucléaire est donc noyée dans la demande du secteur BTP.

Par ailleurs, les différents modules composant l'outil, peuvent présenter un niveau de segmentation plus fin. Par exemple, le sous-secteur « transport terrestre » est lui-même décomposé en tenant compte des véhicules automobiles particuliers, des bicyclettes, du transport ferroviaires etc..., tout comme dans le sous-secteur « bâtiment » il est fait la distinction entre le logement individuel et le logement collectif.



2.2. Cartographie des flux

Une fois les secteurs et sous-secteurs débouchés identifiés, il est possible de mettre en relation les produits de ces secteurs et les matériaux. Ces relations sont décrites par une matrice basée sur le principe suivant :

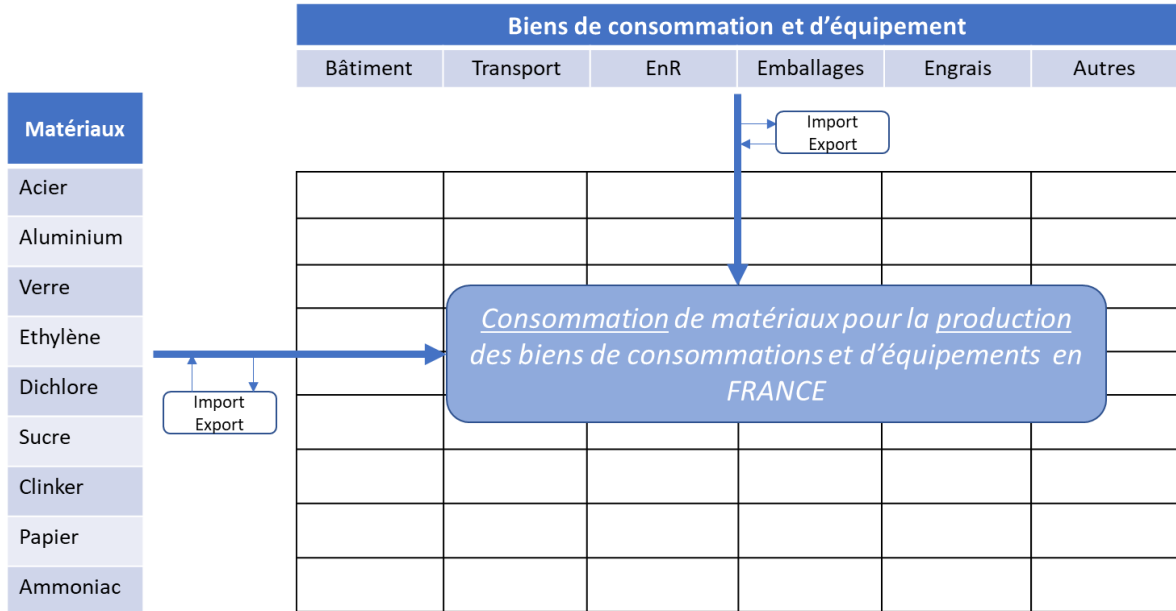


Figure 1 : matrice de référence de consommation de matériaux pour la production de produits finis pour une année donnée

Pour les lignes comme pour les colonnes :

$$\text{Consommation apparente (C)} = \text{Production (P)} + \text{Imports (I)} - \text{Exports (E)}$$

La consommation apparente se distingue de la demande nationale (consommation réelle) par la relation suivante :

$$\text{Consommation apparente (C)} = \text{Demande nationale (D)} + \text{variation de stock à l'année } n$$

La variation de stock n'étant pas toujours connue, dans la majorité des cas, les calculs se font sur la consommation apparente appelée par la suite « consommation ». Ce qui revient à supposer que les stocks restent constants d'une année sur l'autre.

Toutefois les relations entre matériaux et biens de consommation ne peuvent être correctement représentées par une seule matrice, car bien souvent, on passe par des matériaux intermédiaires (qui eux même sont sujets à des imports/exports).

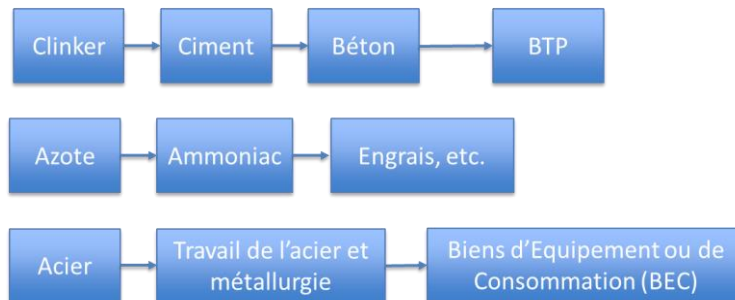


Figure 2 : exemple d'interactions entre matériaux, matériaux intermédiaires et biens de consommation/équipement

Pour correctement modéliser les relations entre matériaux et secteurs débouchés, il est donc nécessaire de recourir à des matrices imbriquées sur le principe suivant :

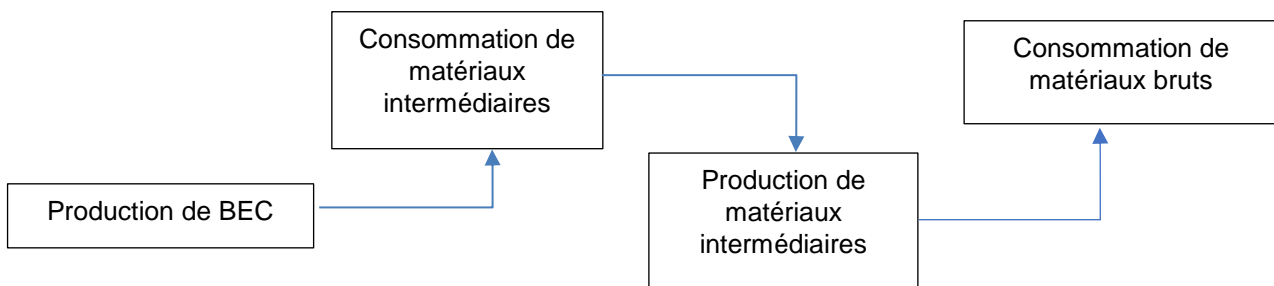


Figure 3 : Principe de matrices permettant d'articuler la production et la consommation de matériaux intermédiaires

Les matrices de références constituant l'état des lieux sur l'année de référence (2014) ont été construites à partir d'études sectorielles décrivant la destination des 9 matériaux du périmètre de l'étude. Ces études ont été complétées par des interviews avec des experts filières (cf. annexes). Les données relatives aux quantités produites, importées et exportées s'appuient sur une agrégation des données Eurostat ou des données sectorielles des différentes filières et des bilans massiques issus de publication d'analyse de cycle de vie dont le détail est donné en annexe. La compilation de toute ces sources de données et moyennant l'établissement de quelques hypothèses supplémentaires, il est possible d'illustrer cette cartographie de référence à partir de la Figure 5.

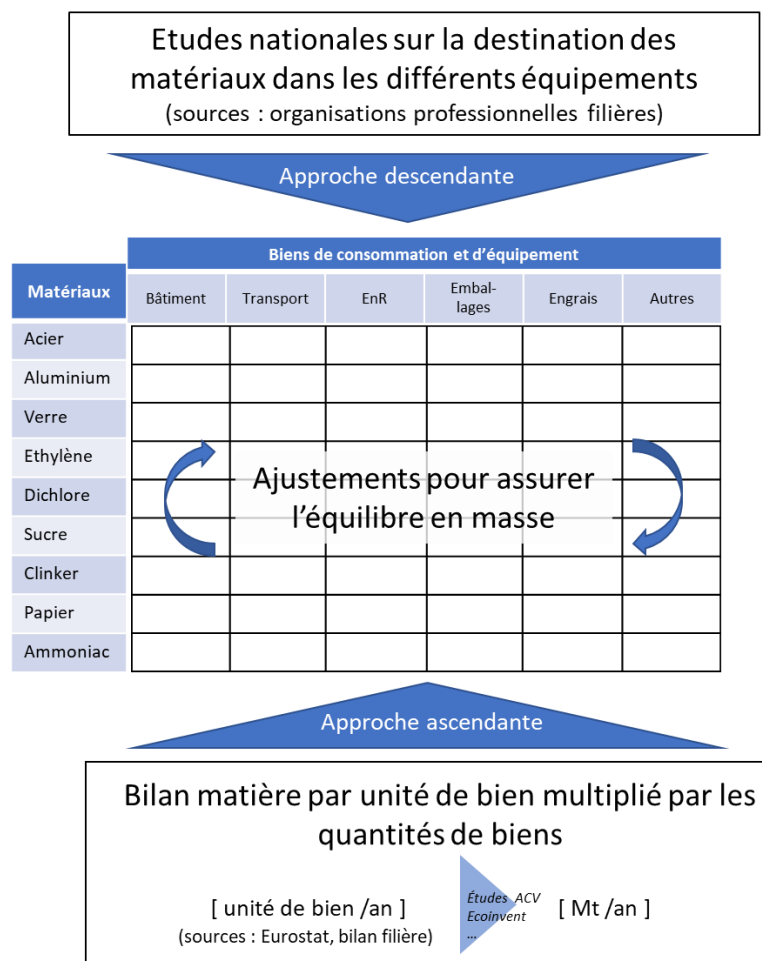


Figure 4 : Combinaison des approches ascendantes et descendantes pour la consolidation de l'état des lieux



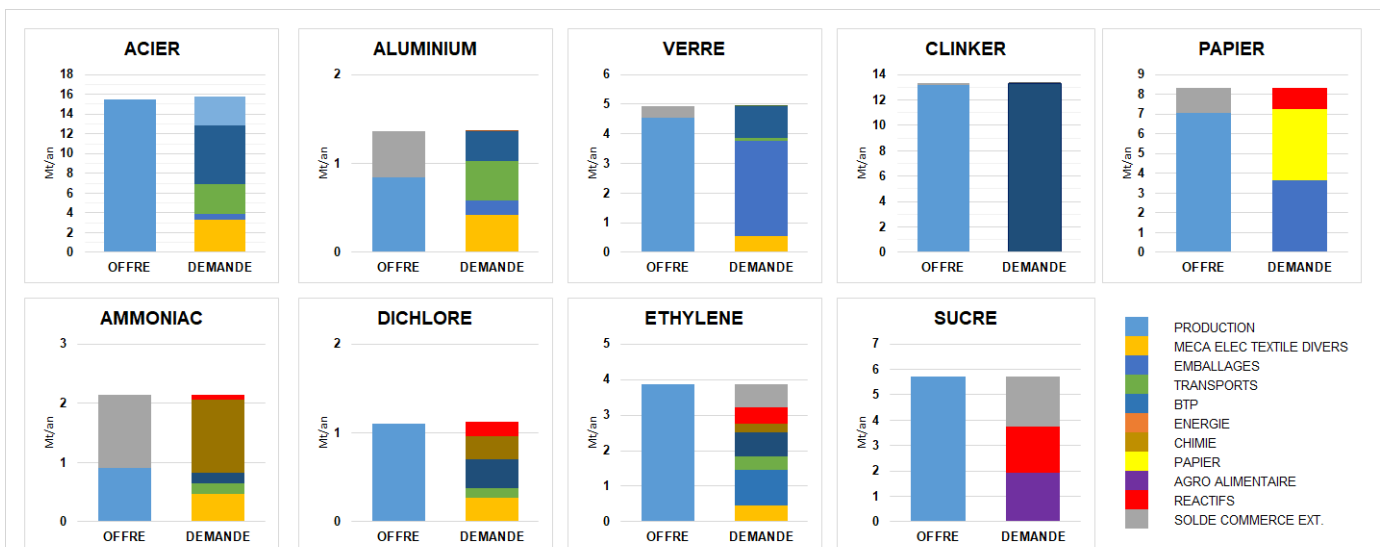


Figure 5 : Cartographie 2014 des flux de matériaux.

2.3. Paramètres du modèle

Sur la base des données de référence de 2014, et pour proposer une modélisation des évolutions possibles jusqu'en 2050, le modèle s'appuie sur plus de 200 paramètres qui sont principalement liés à des hypothèses en lien avec la TEE et dont il est possible d'effectuer la saisie à un pas annuel.

La liste exhaustive de ces paramètres est disponible en annexe. Ces paramètres sont regroupés en 7 grandes familles :

- Sobriété et mode de consommation,
- Substitution de matériaux et de produits,
- Efficacité énergétique des Bâtiments,
- Déploiement des EnR,
- Recyclage des matériaux,
- Démographie,
- Localisation de la production des matériaux et des biens d'équipements et localisation de la consommation.

A noter que sur ces 200 paramètres, seuls une minorité ont fait l'objet d'une formulation d'hypothèses dans le cadre des scénarios prospectifs de l'ADEME établis en 2012, et que cette étude permet également d'initier des réflexions prospectivistes sur ceux-ci.



3. Limites du modèle et perspectives

3.1. Incertitudes statistiques, VA et quantité

Il existe trois façons de quantifier les quantités de BEC. Chacune présente des avantages et des inconvénients, mais de manière générale, les quantités de BEC sont généralement accessible en valeur alors que cette étude vise à raisonner en masse.

3.1.1. Unité de nombre

Cette unité est la plus courante et la plus accessible. Les statistiques douanières répertorient par exemple le « nombre » de véhicules produits et échangés, ou bien le nombre de vêtements.

Cette unité présente cependant l'inconvénient majeur qu'il est impossible de sommer ces quantités dans un regroupement. Par exemple dans le secteur de la mécanique, sommer indifféremment le nombre de grues et de robinets n'a aucun sens. On peut toutefois imaginer qu'un produit très représentatif puisse à lui seul être le déterminant du secteur mais c'est rarement le cas.

3.1.2. Unité de masse

Cette unité est la plus pertinente car elle permet de mettre en relation la masse du produit fini et celle de ses éléments constitutifs. De plus, on peut sans difficulté, sommer les masses des différents produits constitutifs d'un regroupement. Malheureusement cette donnée est rarement accessible sauf par exemple pour les engrais et certains vêtements.

La masse totale d'une catégorie peut être approximée en attribuant à chaque typologie de produit une masse unitaire (par exemple le poids moyen d'une automobile est d'environ 1,5 tonne, celui d'une bouteille en verre de 200 g). A partir du nombre de chacun des éléments, il est possible de calculer la masse totale du regroupement. On peut alors par recoupement, essayer de faire coïncider la masse totale avec celle des matériaux entrants. Cette masse unitaire est cependant source d'incertitude et peut générer une masse totale erronée.

3.1.3. Unité de valeur

Les douanes ou la Direction Générale des Entreprises (DGE) communiquent les valeurs (en €) des différents biens et ces données sont facilement accessibles. (DGE, 2015), On peut y trouver le chiffre d'affaire de la production d'un regroupement de biens, ainsi que le volume financier des importations et des exportations. Néanmoins, ces données ne sont pas proportionnelles aux flux massiques. Les valeurs unitaires des objets importés ou exportés ne sont pas nécessairement identiques. Ceci implique que les valeurs des imports et des exports ne correspondent pas nécessairement aux tonnages ou au nombre d'objets produits et échangés. Or ce sont bien les tonnages qui permettent dans un exercice prospectif d'établir l'incidence d'une variation de la demande sur la production de matériaux.

3.1.4. Approches retenues dans l'étude

Dans cette étude les approches en masse et en valeur sont utilisées :

- Lorsqu'elles sont accessibles, les données en masse sont utilisées : c'est le cas pour le BTP, les emballages, les transports, les engrais, les papiers/cartons, etc.
- Lorsque cela n'est pas possible, les données en valeur sont retenues car ce sont les seules données fiables et agrégées à disposition. C'est le cas pour les biens issus des industries mécanique, électriques et électroniques et les produits chimiques de consommation. Dans ce cas, la masse totale de biens produits en France est la somme des matériaux consommés pour cette production. La masse de biens consommés est déduite grâce au coefficient P/C bien que celui-ci ait été calculé en valeur. Cette approximation suppose que les BEC ne sont constitué que des matériaux étudiés et la valeur et la composition des biens importés et exportés sont identiques.

A la lecture des résultats de la cartographie, cette dernière approche est surtout critique pour la construction mécanique.



3.2. Limites en termes de périmètre

3.2.1. Seuls neuf matériaux sont analysés

Cette première étude se limite à l'analyse de neuf matériaux. Ces 9 matériaux ont été sélectionnés au regard du poids important qu'ils ont dans la consommation énergétique actuelle de l'industrie française. Dans une vision prospective, où la cartographie est modifiée, du fait des substitutions et du fait de la modification du commerce international, cette liste de matériaux prioritaires est susceptible d'être modifiée.

3.2.2. Certains biens d'équipements et de consommation non pris en compte

Faute de données disponibles certains biens d'équipements et de consommation n'ont pas été modélisés dans cette étude. Il s'agit par exemple des matériaux nécessaires à la maintenance des installations énergétiques fossiles et fissiles existantes.

3.3. Stocks de matériaux et anomalies de l'année de référence

3.3.1. Représentativité de l'année de référence

Certaines productions de biens ou de matériaux sont susceptibles de varier de manière importante en fonction des années. Par exemple, en 2014 il n'y a pas eu d'activité de construction de centrale nucléaire donc il n'y a pas de consommation d'acier associée. Il est alors possible que le choix de l'année de référence influe sur la cartographie initiale d'utilisation des matériaux pour les différents secteurs. Ainsi, il se peut qu'il y ait un écart entre les données concernant les matériaux et celles concernant les biens d'équipement et de consommation.

3.3.2. Stock de matériaux intermédiaires et primaires

L'outil dispose d'une colonne « stock » qui référence la part de production non destinée à la vente au cours de l'année 2014. Cette colonne a été peu renseignée faute de données statistiques. Dans la majorité des cas, la consommation indiquée est une « consommation apparente » c'est à dire sans tenir compte de la variabilité des stocks.

Cette non prise en compte peut générer des incertitudes sur la consommation de matériaux et de BEC sous-jacents. Les hypothèses prospectives s'appliquent à des consommations apparentes alors qu'elles devraient s'appuyer sur des consommations réelles.

3.3.3. Variation des immobilisation matière dans les BEC & gisement de déchets

La modélisation des gisements de déchets en fonction des évolutions de la consommation pourrait être affinée en fonction des années. En effet, le modèle ne permet pas de gérer un stock de déchet, il est donc impossible de connaître la quantité de MPR disponible en vue de leur réincorporation éventuelle.

3.4. Imports, exports et solde net

Faute de données accessibles, le modèle ne tient pas compte précisément des importations et des exportations. Le modèle raisonne en solde net. Ainsi, il est tout à fait possible que dans les faits, la production nationale soit exclusivement destinée à l'export et que la demande nationale soit entièrement satisfaite par des importations. Cette approche ne permet pas une modélisation fine des échanges internationaux, c'est pourquoi le modèle s'appuie sur un coefficient P/C (Production / Consommation) pour faire le lien entre la demande intérieure et le niveau de production.

3.5. Synthèse des perspectives d'amélioration

Ces travaux posent ainsi les premières bases d'un outil de modélisation des niveaux de production industriels à horizon 2050. Ils ont permis d'identifier les paramètres structurants d'un tel exercice et les difficultés méthodologiques correspondantes.

En définissant le calage de données pour l'année 2014, ces travaux ont mis en évidence certaines lacunes statistiques pour développer une modélisation réconciliant l'approche physique (caractéristique de l'impact environnemental) de l'approche économique (caractérisant la dynamique industrielle).

Les prochains travaux devront améliorer ces approches, notamment à travers de nouvelles corrélations, tout en élargissant le périmètre de modélisation à d'autres matériaux et marchés.



ANNEXES

4. Recyclage : définitions méthodologiques et influence sur l'étude

Le cycle de vie d'un matériau, sa transformation en un bien d'équipement ou de consommation (BEC) et son recyclage éventuel peuvent être représenté par le schéma de la Figure ci-dessous.

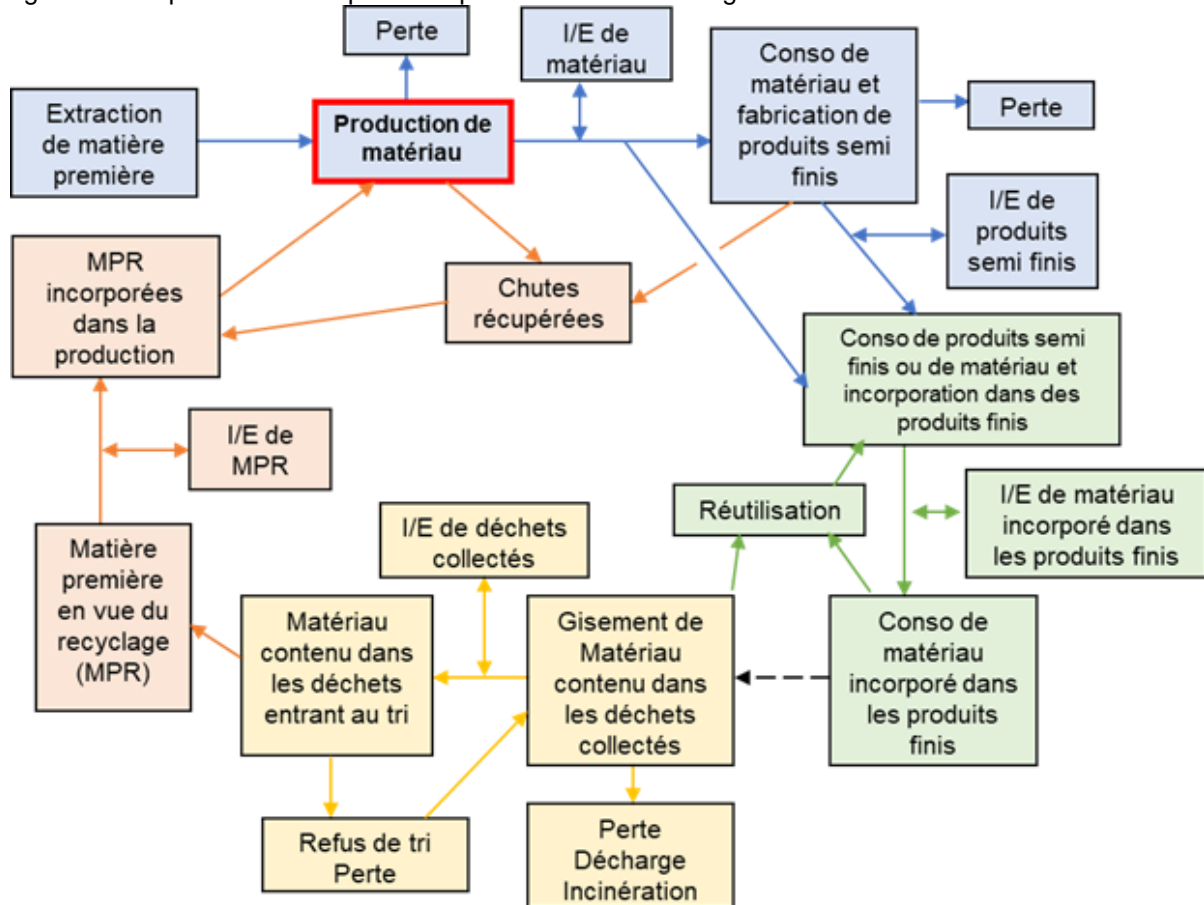


Figure 6 : Schéma du cycle de vie d'un matériau et flux de transformation

Le cycle de vie est caractérisé par les transformations suivantes :

- La **production de matériau** soit sous forme MPV (Matière Première Vierge) à partir d'intrants extraits ou fabriqués (fer, bauxite, éthylène, etc.) ou de MPR (matière première recyclée). Le matériau issu de MPV est appelé matériau primaire, celui issu de MPR, matériau secondaire
- La **transformation et le travail de ce matériau** pour aboutir à des produits semi finis (barres, plaques, tubes, fil, etc.)
- L'incorporation de ces éléments semi finis ou bien de matériaux bruts dans des **biens d'équipement et de consommation** (BEC : construction, automobile, électroménager, etc.)
- La **collecte de déchets**. Le volume de déchets est en relation avec la consommation de biens ayant été produits plusieurs années auparavant. Sur la base d'une distribution statistique des durées de vie estimées et des consommations des années antérieures, on peut calculer les volumes de déchets produits par usage (VHU, EEE, construction, etc.). En appliquant le pourcentage de matériau dans chacun de ces usages, on peut théoriquement estimer le gisement de matériau contenu dans les déchets. Ce calcul qui est effectué pour les filières REP est néanmoins complexe et incertain. Il n'a pas d'incidence dans le présent rapport.
- Le **tri et la valorisation matière** des déchets avec son efficacité qui produit des MPR (matière première en vue du recyclage). Avant leur introduction dans la production, ces MPR peuvent être sujettes à des imports/exports.

Selon les matériaux, le schéma peut différer, être plus simple ou plus complexe. Par exemple, pour l'acier, le schéma est un peu plus complexe : production de fonte intermédiaire, création de produits sidérurgiques en coulée continue, puis différentes étapes dans le travail de l'acier et la métallurgie. Les fonderies utilisent leur propre récupération de ferrailles.



Les définitions relatives au rendement matière et aux taux de transformation peuvent différer d'une filière à l'autre. Afin d'harmoniser ces définitions, nous proposons les définitions suivantes issues du bilan recyclage (ADEME, Bilan national du recyclage 2005-2014, 2017) que l'on peut également retrouver dans un rapport de l'ONU (UNEP, 2011)

- Le **taux de collecte** représente le volume de matériau entrant au tri sur le gisement estimé de matériau contenu dans les déchets. Le reste est perdu, incinéré ou enfoui, donc sans valorisation matière.
- Le **taux de recyclage** représente le volume effectivement récupéré en vue du recyclage sur le volume entrant en centre de tri donc collecté. Le reste est perdu ou refusé. Ce terme est ambigu car parfois il inclut non seulement le volume recyclé mais également réutilisé.
- Le taux de **valorisation** représente le taux de recyclage auquel on ajoute le volume de déchets valorisés énergétiquement donc incinérés sur le volume entrant en centre de tri.
- Le **taux d'incorporation de Matière Première Recyclée (MPR)** dans la production représente comme son nom l'indique la part de matière issue du recyclage sur la totalité produite.
- L'**efficacité de récupération** est le produit du taux de collecte par le taux de recyclage et correspond à l'efficacité globale entre ce qui est effectivement récupéré en sortie du centre de tri et le gisement potentiel dans les déchets. Cela correspond au terme anglais EOR-RR (End of Life Recycling Rate) comme explicité dans le rapport de l'ONU (UNEP, 2011)

Dans le présent rapport, seul ces deux derniers taux seront utilisés : taux de valorisation et taux d'incorporation de MPR. Parfois nous évoquerons également le taux de collecte.

Dans une prospective à l'horizon 2050, il est avantageux énergétiquement d'augmenter la part de MPR dans le processus de fabrication, donc le taux d'incorporation. Celui-ci dépendra cependant de la disponibilité en MPR à l'année en question. Cette quantité est elle-même fonction :

- Du gisement de matériau contenu dans les déchets difficiles à évaluer car dépendant des quantités consommées plusieurs années auparavant avec des durées de vie supposées.
- De l'efficacité de la récupération de la matière.

A noter que l'évolution des taux d'incorporation de MPR conditionne de manière importante l'énergie nécessaire à la fabrication des BEC. Néanmoins, dans le cadre de cette étude, qui se concentre sur l'évaluation des tonnages de matériaux, ce taux d'incorporation ne modifie pas les masses de matériaux totaux évalués à l'exception des plastiques. En effet pour les plastiques, le taux d'incorporation conditionne la consommation d'intrants chimiques de base, essentiellement l'éthylène et le chlore qui font partie du périmètre de l'étude.

5. Données sur les biens d'équipements et de consommations

Les biens de consommation et d'équipement désignent l'ensemble des marchandises qui à l'issue d'un circuit de distribution et de vente, sont accessibles aux ménages ou aux entreprises.¹

Ne rentrent pas dans cette catégorie, les matériaux qu'ils soient bruts ou intermédiaires. Par exemple un sac de ciment n'a aucune utilité directe et est inévitablement appelé à être transformé. Il s'agit d'un matériau brut pourtant couramment accessible dans les magasins. De la même façon, le béton est un matériau intermédiaire.

L'étude s'appuie sur la Nomenclature d'activités économiques pour l'étude des livraisons et Consommations d'Energie (NCE) qui distingue ce qui relève des BEC et ce qui relève des matériaux (voir tableau ci-après). Ce choix de classification est motivé par le fait de corréliser ultérieurement les flux à des consommations d'énergie qui elles, sont répertoriées en fonction de la classification NCE (voir tableau ci-après).

Il faut noter que certains secteurs comme par exemple « chimie organique » regroupent à la fois des matériaux de base (éthylène) et des BEC appartenant à la chimie fine (encre, vernis, etc.)

Tableau 1: Distinctions entre matériaux, matériaux intermédiaires et BEC dans les différents secteurs NCE.

Secteur NCE	Matériau	Matériau intermédiaire	BEC
E16 - Sidérurgie	X	X	
E18 - Métallurgie de première transformation des métaux non ferreux	X	X	
E19 - Production de minéraux divers	X		
E20 - Fabrication de plâtres, produits en plâtre, chaux et ciments	X		
E21 - Production d'autres matériaux de construction et de céramique		X	
E22 - Industrie du verre	X		
E23 - Fabrication d'ammoniac et d'engrais	X		X
E24 - Autres industries de la chimie minérale		X	
E25 - Fabrication de matières plastiques, de caoutchouc synthétique et de fibres artificielles ou synthétiques		X	
E26 - Autres industries de la chimie organique de base	X	X	X
E28 - Parachimie et industrie pharmaceutique			X
E29 - Fonderie et travail des métaux		X	X
E30 - Construction mécanique			X
E31 - Construction électrique et électronique			X
E32 - Construction de véhicules automobiles et d'autres matériels de transport terrestre			X
E33 - Construction navale et aéronautique, armement			X
E34 - Industrie textile, du cuir et de l'habillement			X
E35 - Industrie du papier et du carton		X	X
E36 - Fabrication de produits en caoutchouc		X	
E37 - Fabrication de produits en plastique		X	
E38 - Industries diverses			X
E39 - Génie civil			X

Cette partie porte sur la description des données sources utilisées pour la cartographie des niveaux de production / consommation des différents biens consommés en France et leur évolution à 2050.

¹ Cela peut aller d'un simple crayon à un grand bâtiment tertiaire voire une usine. Dans le premier cas, on parlera plutôt de « bien de consommation », ce qui équivaut en comptabilité aux « fournitures » ou aux « consommables ». En revanche, l'usine est un bien d'équipement, en ce sens qu'elle ne répond pas à un besoin immédiat du consommateur mais elle est utile pour satisfaire indirectement ces besoins en fabriquant des marchandises adéquates. En comptabilité, on parlerait d'immobilisation. Cette distinction ne manque pas d'ambiguïtés. Une maison individuelle est un bien de consommation en ce sens qu'elle satisfait le besoin direct d'un ménage, et pourtant elle fait clairement partie des « immobilisations ». A l'inverse un tournevis devrait en théorie être considéré comme un bien d'équipement alors qu'il est une simple fourniture accessible dans tous les supermarchés. Cette distinction n'a toutefois pas d'importance pour cette étude. Les secteurs étudiés comprennent un mélange des deux. Par exemple, le secteur de la mécanique comprend indifféremment des machines-outils et des objets. Le secteur des transports comprend des automobiles et des pièces détachées.



5.1. Mécanique, électricité, textile, divers

5.1.1. Le secteur de la mécanique

Le secteur de la mécanique (NCE 30) comprend les éléments suivants :

Tableau 2 : Ensemble des biens couverts par le secteur de la mécanique

2529Z - Fabrication d'autres réservoirs, citernes et conteneurs métalliques
2530Z - Fabrication de générateurs de vapeur, à l'exception des chaudières pour le chauffage central
2573A - Fabrication de moules et modèles
2651B - Fabrication d'instrumentation scientifique et technique
2652Z - Horlogerie
2670Z - Fabrication de matériels optique et photographique
2680z - Fabrication de supports magnétiques et optiques
2812Z - Fabrication d'équipements hydrauliques et pneumatiques
2813Z - Fabrication d'autres pompes et compresseurs
2814Z - Fabrication d'autres articles de robinetterie
2815Z - Fabrication d'engrenages et d'organes mécaniques de transmission
2821Z - Fabrication de fours et brûleurs
2822Z - Fabrication de matériel de levage et de manutention
2824Z - Fabrication d'outillage portatif à moteur incorporé
2825Z - Fabrication d'équipements aérauliques et frigorifiques industriels
2829A - Fabrication d'équipements d'emballage, de conditionnement et de pesage
2829B - Fabrication d'autres machines d'usage général
2830Z - Fabrication de machines agricoles et forestières
2841Z - Fabrication de machines-outils pour le travail des métaux
2849Z - Fabrication d'autres machines-outils
2891Z - Fabrication de machines pour la métallurgie
2892Z - Fabrication de machines pour l'extraction ou la construction
2893Z - Fabrication de machines pour l'industrie agro-alimentaire
2894Z - Fabrication de machines pour les industries textiles
2895Z - Fabrication de machines pour les industries du papier et du carton
2896Z - Fabrication de machines pour le travail du caoutchouc ou des plastiques
2899A - Fabrication de machines d'imprimerie
2899B - Fabrication d'autres machines spécialisées
3312Z - Réparation de machines et équipements mécaniques
3320B - Installation de machines et équipements mécaniques
3320C - Conception d'ensemble et assemblage sur site industriel d'équipements de contrôle des processus industriels

Ce secteur comprend beaucoup de biens très disparates : par exemple, des engrenages légers (intermédiaires pour d'autres usages) et des machines ou des tracteurs plus lourds. Il est impossible d'agrèger ces données en masse ou en quantité, d'autant plus que le fichier Eurostat comprend de nombreux secrets statistiques. En valeur économique, on obtient les chiffres suivants (DGE, 2015), (EUROSTAT, 2014).

Tableau 3 : Chiffre d'affaire et commerce du secteur de la mécanique

Dénomination	Unité	Source	Conso	Export	Import	Prod	Coef P/C
Réservoirs, générateurs, moules	G€	EUROSTAT		0,60	0,56		
Instrumentation	G€	EUROSTAT		8,11	8,16		
Equipements, outils, composants	G€	EUROSTAT		16,33	16,22		
Machines	G€	EUROSTAT		14,53	15,71		
TOTAL Mécanique	G€	DGE	48,72	35,68	38,00	46,40	0,95

On constate que l'activité génère des mouvements de capitaux aussi importants que le chiffre d'affaire de la production. Elle est légèrement importatrice nette (Consommation > Production).

Les imports et exports sont à peu près équivalents dans tous les secteurs : on ne constate pas de secteur où la France serait spécialisée et exporterait massivement.

Ce secteur dépend des autres activités puisqu'il fournit les outils et les équipements destinés à la fabrication. Il fournit également les réservoirs, les brûleurs, les fours, les équipements de CVC (chauffage, ventilation, climatisation). Une évaluation plus fine pourrait étudier l'influence des évolutions du bâtiment et des transports sur ce secteur.

Une augmentation de la durée de vie de ces équipements pourrait induire une baisse de la demande par habitant de ce type d'équipement.

5.1.2. Le secteur de l'électricité et de l'électronique

Ce secteur (NCE 31) comprend d'une part l'**électricité** avec les biens ci-dessous :

Tableau 4 : Ensemble des biens couverts par le secteur de l'électricité

2711Z - Fabrication de moteurs, génératrices et transformateurs électriques
2712Z - Fabrication de matériel de distribution et de commande électrique
2720Z - Fabrication de piles et d'accumulateurs électriques
2731Z - Fabrication de câbles de fibres optiques
2732Z - Fabrication d'autres fils et câbles électroniques ou électriques
2733Z - Fabrication de matériel d'installation électrique
2740Z - Fabrication d'appareils d'éclairage électrique
2751Z - Fabrication d'appareils électroménagers
2752Z - Fabrication d'appareils ménagers non électriques
2790Z - Fabrication d'autres matériels électriques
2823Z - Fabrication de machines et d'équipements de bureau (à l'exception des ordinateurs et équipements périphériques)
2931Z - Fabrication d'équipements électriques et électroniques automobiles
3250A - Fabrication de matériel médico-chirurgical et dentaire
3314Z - Réparation d'équipements électriques

Il intègre également l'**électronique** avec les biens ci-dessous :

Tableau 5 : Ensemble des biens couverts par le secteur de l'électronique

2611Z - Fabrication de composants électroniques
2612Z - Fabrication de cartes électroniques assemblées
2620Z - Fabrication d'ordinateurs et d'équipements périphériques
2630Z - Fabrication d'équipements de communication
2640Z - Fabrication de produits électroniques grand public
2660Z - Fabrication d'équipements d'irradiation médicale, d'équipements électromédicaux et électrothérapeutiques

Les flux financiers fournis par (DGE, 2015) et (EUROSTAT, 2014) sont les suivants :

Tableau 6 : Chiffre d'affaire et commerce du secteur de l'électricité et de l'électronique

Dénomination	Unité	Source	Conso	Export	Import	Prod	Coef P/C
TOTAL Electricité	G€	DGE	33,90	18,28	22,18	30,00	0,89
Moteurs, câbles, commande	G€	EUROSTAT		12,59	12,13		
Electroménager	G€	EUROSTAT		3,70	7,65		
Autres équipements électriques	G€	EUROSTAT		3,51	5,67		
TOTAL Electronique	G€	DGE	49,17	27,72	41,49	35,40	0,72
Composants électroniques	G€	EUROSTAT		7,27	5,59		
Informatique, téléphonie, appareils bruns	G€	EUROSTAT		8,32	23,97		
Equipements spéciaux	G€	EUROSTAT		2,01	2,20		



La France équilibre sa balance commerciale pour le matériel électrique mais est importatrice nette pour ce qui concerne l'électroménager et les équipements spécifiques (médical, automobile, etc.).

Pour l'électronique, la France exporte des composants électroniques mais est nettement déficitaire en ce qui concerne les appareils informatiques et grands publics. La production annuelle d'ordinateurs avoisine les 100 000 unités et la consommation est de 8 millions d'unités (EUROSTAT, 2014).

Pour la téléphonie, la différence est encore plus grande puisqu'aucun téléphone portable n'est produit en France alors que 24 millions par an sont consommés (EUROSTAT, 2014).

Pour les équipements électriques, la même approche que pour les équipements mécaniques pourrait être retenue.

Pour l'électronique, il est bien difficile de prédire qu'elle sera l'évolution de ce secteur. L'énergie grise de fabrication est un facteur clé pour ce secteur. Les marges de manœuvre sont importantes pour augmenter la durabilité des produits aujourd'hui très dépendante de besoins croissant en puissance parfois décorrélés de fonctionnalités additionnelles, voire liés à des effets de mode. A cela il faut ajouter l'obsolescence programmée prouvée pour certaines imprimantes et la non réparabilité des objets.

Une modification de ces pratiques pourrait entraîner un facteur de sobriété plus important que les autres secteurs. En revanche les appareils connectés, les développements du digital et des cartes embarquées pourraient entraîner une augmentation de la demande du secteur.

5.1.3. Le secteur du textile et de l'habillement

Le secteur du textile et de l'habillement (NCE 34) comprend les biens ci-dessous :

Tableau 7 : Ensemble des biens couverts par le secteur du textile

1310Z - Préparation de fibres textiles et filature
1320Z - Tissage
1330Z - Ennoblement textile
1391Z - Fabrication d'étoffes à mailles
1392Z - Fabrication d'articles textiles, sauf habillement
1393Z - Fabrication de tapis et moquettes
1394Z - Fabrication de ficelles, cordes et filets
1395Z - Fabrication de non-tissés, sauf habillement
1396Z - Fabrication d'autres textiles techniques et industriels
1399Z - Fabrication d'autres textiles n.c.a.
1411Z - Fabrication de vêtements en cuir
1412Z - Fabrication de vêtements de travail
1413Z - Fabrication de vêtements de dessus
1414Z - Fabrication de vêtements de dessous
1419Z - Fabrication d'autres vêtements et accessoires
1420Z - Fabrication d'articles en fourrure
1431Z - Fabrication d'articles chaussants à mailles
1439Z - Fabrication d'autres articles à mailles
1511Z - Apprêt et tannage des cuirs ; préparation et teinture des fourrures
1512Z - Fabrication d'articles de voyage, de maroquinerie et de sellerie
1520Z - Fabrication de chaussures

Le secteur comprend la fabrication de textiles et d'étoffes et également des vêtements. On pourrait considérer les textiles comme un matériau intermédiaire mais à ce stade nous avons considéré le secteur dans son ensemble.

Les flux financiers (DGE, 2015) et (EUROSTAT, 2014) sont les suivants :

Tableau 8 : Chiffre d'affaire et commerce du secteur textile et habillement

Dénomination	Unité	Source	Conso	Export	Import	Prod	Coef P/C
Textiles	G€	EUROSTAT		3,92	5,22		
Habillement	G€	EUROSTAT		8,57	18,68		
Maroquinerie	G€	EUROSTAT		7,79	9,51		
TOTAL Textile et habillement	G€	DGE	25,92	20,51	33,53	12,90	0,50

La baisse de la consommation de matériaux du secteur du textile pourrait être envisagée pour deux raisons :

- **Baisse de consommation de vêtements par personne.** Le niveau de consommation français peut être diminué grâce à un moindre suivi des effets de mode (notamment limitation de la publicité) et une amélioration de la qualité des vêtements.
- **Augmentation du ré-emploi** (vêtements de seconde main). Elle sera rendue possible par une amélioration de la récupération des vieux vêtements de leur tri et de leur éventuelle remise en forme. Elle suppose aussi une banalisation également de l'utilisation de vêtements d'occasion comme dans les pays nordiques (ex : Norvège avec sa chaîne de magasin Fretex fortement développée dans chaque ville).

5.1.4. Le secteur des biens divers

Le secteur des biens divers (NCE 38) comprend les éléments suivants :

Tableau 9 : Ensemble des biens couverts par le secteur des divers

1610A - Sciage et rabotage du bois, hors imprégnation
1610B - Imprégnation du bois
1621Z - Fabrication de placage et de panneaux de bois
1622Z - Fabrication de parquets assemblés
1623Z - Fabrication de charpentes et d'autres menuiseries
1624Z - Fabrication d'emballages en bois
1629Z - Fabrication d'objets divers en bois ; fabrication d'objets en liège, vannerie et sparterie
1811Z - Imprimerie de journaux
1812Z - Autre imprimerie (labeur)
1813Z - Activités de pré-presse
1814Z - Reliure et activités connexes
1820Z - Reproduction d'enregistrements
3101Z - Fabrication de meubles de bureau et de magasin
3102Z - Fabrication de meubles de cuisine
3103Z - Fabrication de matelas
3109A - Fabrication de sièges d'ameublement d'intérieur
3109B - Fabrication d'autres meubles et industries connexes de l'ameublement
3211Z - Frappe de monnaie
3212Z - Fabrication d'articles de joaillerie et bijouterie
3213Z - Fabrication d'articles de bijouterie fantaisie et articles similaires
3220Z - Fabrication d'instruments de musique
3230Z - Fabrication d'articles de sport
3240Z - Fabrication de jeux et jouets
3250B - Fabrication de lunettes
3291Z - Fabrication d'articles de broserie
3299Z - Autres activités manufacturières n.c.a.
3311Z - Réparation d'ouvrages en métaux
3313Z - Réparation de matériels électroniques et optiques
3319Z - Réparation d'autres équipements
3320A - Installation de structures métalliques, chaudronnées et de tuyauterie
3320D - Installation d'équipements électriques, de matériels électroniques et optiques ou d'autres matériels
3831Z - Démantèlement d'épaves
3832Z - Récupération de déchets triés



Ce secteur rassemble toutes les autres activités non traitées par ailleurs. On y constate une grande hétérogénéité :

- Une première partie concerne le travail du bois d'œuvre et la fabrication de panneaux, qui est une activité intermédiaire destinée essentiellement au bâtiment et au mobilier
- Une deuxième partie concerne l'impression pouvant être corrélée au papier graphique.
- Une troisième partie concerne divers articles tels que des instruments de musique, de sport, des jouets, des bijoux, etc.

Les flux financiers (DGE, 2015) et leur décomposition (EUROSTAT, 2014) sont les suivants :

Tableau 10 : Chiffre d'affaire et commerce du secteur des divers

Dénomination	Unité	Source	Conso	Export	Import	Prod	Coef P/C
Travail et objets en bois	G€	EUROSTAT		1,95	3,47		
Impression	G€	EUROSTAT		nd	nd		
Meubles	G€	EUROSTAT		1,73	5,66		
Sport, jouets, etc.	G€	EUROSTAT		12,36	16,62		
Réparation	G€	EUROSTAT		nd	nd		
TOTAL Divers	G€	DGE	22,08	14,53	22,81	13,80	0,62

Toutes les activités sont importatrices nettes.

En faisant l'hypothèse d'une plus grande durée de vie et d'une relative sobriété sur ces différents équipements la consommation de ces équipements devrait diminuer.

Le secteur de la réparation devrait augmenter en raison des leviers évoqués pour réduire la demande.

5.2. Produits chimiques de consommation

5.2.1. Les engrais

Les engrais peuvent être répartis en trois familles :

- Les engrais potassiques (K₂O) formés à partir du chlorure de potassium directement extrait du sol.
- Les engrais phosphates (P₂O₅) également formés avec du phosphate extrait dans des mines.
- Les engrais azotés (N) dont l'azote provient en très grande majorité de l'ammoniac puis de différents composés chimiques de base qui permettent la distinction en différentes sous-familles :

Tableau 11 : Différents types d'engrais et pourcentage d'azote

Type d'engrais les plus courants		% d'azote
Ammoniaque anhydre	<i>Ammonia</i>	82% N
Urée	<i>Urea</i>	46%N
Ammonitrate	<i>Ammonium nitrate (AN)</i>	33,5% N
Ammonitrate calcaire	<i>Calcium ammonium nitrate (CAN)</i>	27% N
Solution azotée	<i>Solutions (UREA+AN) (UAN)</i>	30% N

A cela il faut rajouter des engrais mixtes (NP et NK) qui seront la teneur en ammoniac seront classés parmi les engrais azotés ou non.

Ne sont étudiés ici que les engrais azotés car contrairement aux autres fertilisants, leur fabrication est dépendante de l'ammoniac et requiert des quantités d'énergie significative.

Les engrais azotés sont largement décrits dans le paragraphe relatif à l'ammoniac. Les statistiques en masse sont accessibles et les quantités ainsi que les valeurs du commerce d'engrais azotés en 2014 sont présentées ci après.

Tableau 12 : Flux des engrais azotés en masse et en valeur (EUROSTAT, 2014)

Dénomination	Unité	Conso	Export	Import	Prod	Coef P/C
Engrais azotés	Mt NH ₃	2,681			1,242	0,46
Engrais azotés	G€	5,135	0,400	2,893	2,642	0,51

On constate que la moitié des engrais azotés sont importés. Cette proportion pourrait être réduite à l'avenir pour compenser la baisse de demande par une baisse des importations.

En termes de perspectives, le scénario Afterres (SOLAGRO, 2016) envisage une forte réduction de la demande d'engrais azotés par habitant (-47% en 2035 et -55% en 2050) ce qui compte tenu de l'augmentation de population représente -40% en 2035 et -50% en 2050.

5.2.2. Les phytosanitaires

Il est difficile d'obtenir des statistiques dans ce secteur. Les flux financiers fournis par la DGE (DGE, 2015) sont les suivants :

Tableau 13 : Chiffre d'affaire et commerce des phytosanitaires en 2014

Dénomination	Unité	Conso	Export	Import	Prod	Coef P/C
Phytosanitaires	G€	2,540	3,323	2,040	3,823	1,51

Il s'agit d'une activité très exportatrice. Les données Eurostat sont incomplètes puisque le total des CA connus donne 2,488 G€ ce qui ne correspond qu'à 65% du total. Le total de masses de substance active représente 0,35 Mt ce qui laisse à penser que le chiffre réel global pourrait être autour de 0,5 Mt.

Les phytosanitaires posent aujourd'hui un certain nombre de problèmes relatifs à la santé humaine et à la destruction de la biodiversité. Afterres2050 (SOLAGRO, 2016), scénario de transition pour l'agriculture prévoit à l'horizon 2050 une baisse de 30 à 50% des phytosanitaires pour les sols cultivés en production intégrée (50% des sols en 2050). Le reste étant en production biologique n'utilisant pas de phytosanitaires.



5.2.3. Les détergents, les solvants et les produits d'entretien

Ce secteur correspondant au code NAF 204 avec les flux financiers suivants (FranceChimie, 2018) (DGE, 2015) :

Tableau 14 : Chiffre d'affaire et commerce des détergents solvants et produits d'entretien

NAF	Dénomination	Unité	Conso	Export	Import	Prod	Coef P/C
2041Z	Savons, détergents et produits d'entretien	G€	2,701	1,650	1,691	2,660	0,98
2042Z	Parfums et produits pour la toilette	G€	7,506	11,278	2,272	16,512	2,20
204	Détergents, solvants	G€	10,206	12,928	3,962	19,172	1,88

Ce secteur est nettement exportateur notamment pour ce qui concerne les parfums et les produits de toilette.

Aucun élément ne permet d'envisager une modification de la demande.

5.2.4. Les peintures, colles, encres et autres

Dans ce secteur sont regroupés un grand nombre de rubriques différentes que le tableau ci-dessous résume :

Tableau 15 : Chiffre d'affaire et commerce des secteurs peintures colles encres et autres (FranceChimie, 2018)

NAF	Dénomination	Unité	Conso	Export	Import	Prod	Coef P/C
203	Peintures, vernis, encres et mastics	G€	3,614	1,600	1,562	3,652	1,01
2051Z	Produits explosifs	G€	0,595	0,166	0,183	0,578	0,97
2502Z	Colles	G€	0,904	0,353	0,313	0,944	1,04
2503Z	Huiles essentielles	G€	1,809	1,896	2,173	1,532	0,85
2509Z	Autres produits	G€	3,902	7,459	5,746	5,615	1,44
	TOTAL	G€	10,824	11,474	9,977	12,321	1,14

Ce secteur est globalement exportateur surtout pour la catégorie « autres produits chimiques » qui comprennent des additifs, des préparations, des réactifs industriels, etc.

Comme pour le secteur de l'entretien, il peut être supposé que la demande par habitant ne va pas varier d'ici 2050.

5.2.5. La pharmacie

L'industrie pharmaceutique comprend des produits de base et des préparations pour les médicaments. Les flux financiers (FranceChimie, 2018) (DGE, 2015) sont les suivants :

Tableau 16 : Chiffre d'affaire et commerce pour le secteur de la pharmacie

NAF	Dénomination	Unité	Conso	Export	Import	Prod	Coef P/C
211	Produits de base	G€	4,783	2,486	6,404	0,865	0,18
212	Préparations pharmaceutiques	G€	31,682	25,501	19,736	37,447	1,18
21	Pharmacie	G€	36,465	27,987	26,140	38,312	1,05

Ce secteur est marqué par une nette importation des produits de base et une nette exportation des préparations. La valeur ajoutée provient essentiellement de la complexité de l'élaboration des produits.

Aucune étude spécifique sur l'évolution de la demande en produits pharmaceutique n'a été identifiée.

5.3. Les emballages

Le secteur des emballages regroupe nombre d'activités fort différentes mais qui ont toutes en commun d'être liées au conditionnement et au transport de marchandises que ce soit par les industriels et les grossistes, ou les ménages. On distingue les emballages ménagers couverts par la REP (Responsabilité élargie du producteur) et les emballages industriels et commerciaux.

Les matériaux concernés par cette étude sont au nombre de six :

- Le papier à destination du carton ondulé, le carton plat entre autres les briques alimentaires et le papier d'emballage
- Le verre sous forme de bouteilles ou de flacons (nb : les gobelets et la vaisselle ne sont pas considérés comme des emballages)
- Les plastiques à usages très diversifiés tels que bouteilles, bouchons, sacs, films, barquettes, boîtes, etc.
- Le bois essentiellement pour les palettes et les caisses mais aussi les emballages légers tels que les cagettes et accessoirement les tambours pour câbles.
- L'acier en premier lieu à usage alimentaire, mais également les futs, tonnelets, aérosols.
- L'aluminium pour les canettes, les barquettes, les aérosols et aussi les tubes et les films.

Les emballages comprennent le matériau proprement dit (par exemple une brique alimentaire en carton) mais également les éléments à partir d'autres matériaux entrant dans sa composition (aluminium pour le revêtement intérieur, bouchon plastique, etc.). Une fois produit et vide, l'emballage est rempli et des emballages pleins sont alors exportés ou importés avec leur contenant.

Les quantités d'emballages pleins consommés et leur répartition sont indiquées sur la figure suivante. Les emballages en bois (palettes, cageots) concernent essentiellement la distribution de gros et non pas les ménages. C'est également vrai à 75% des papiers cartons. En revanche, 80 % des emballages en verre sont des bouteilles consommées par les ménages.

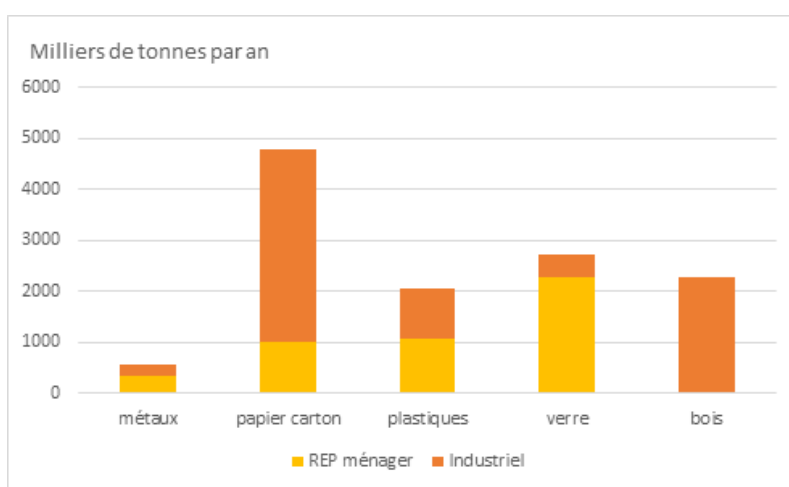


Figure 7: Répartitions des consommations d'emballages pleins selon leur usage et leur matériau constitutif (ADEME, 2014) (Adapté pour l'année 2014)

En plus des emballages vides produits, consommés puis remplis et enfin des emballages pleins consommés avec leur contenu, une fraction non négligeable de ceux-ci sont réutilisés. C'est le cas des palettes en bois et dans une moindre mesure des bouteilles en verre, des boîtes en plastique et des futs en acier.

La figure ci-après représente les emballages neufs et réutilisation et le taux de réutilisation.



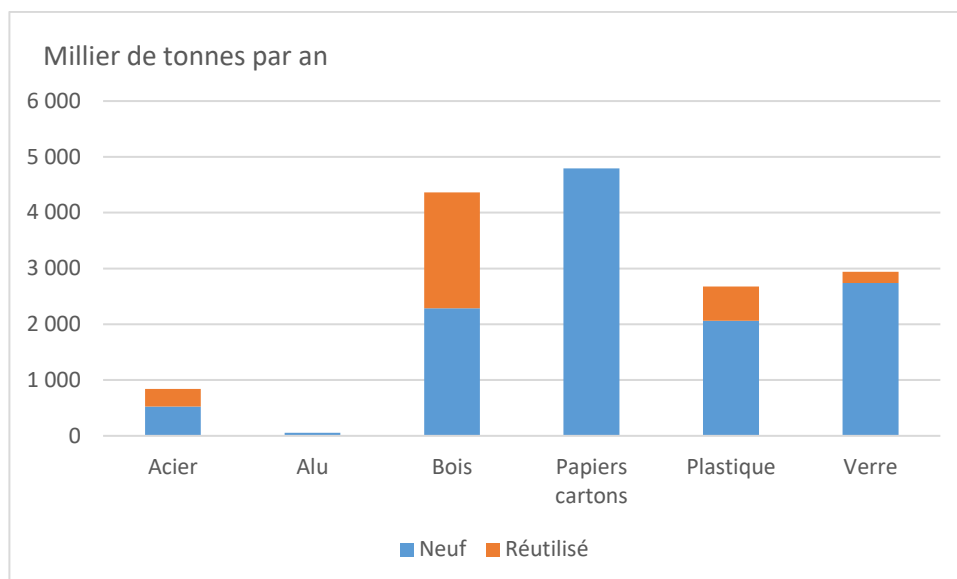


Figure 8 : Tonnage comparatifs des emballages neufs et réutilisés consommés en France en 2014 (Estimation ADEME)

Le bois, essentiellement celui des palettes, est réutilisé à 47%. Le plastique (bacs, bidons et palettes) est réutilisé à 23 %, le verre (futs, tonnelets, IBC) à 37% et le verre de bouteilles à 7%. L'aluminium et les papiers cartons ne sont pas réutilisés.

Le schéma général des flux d'emballages est le suivant :

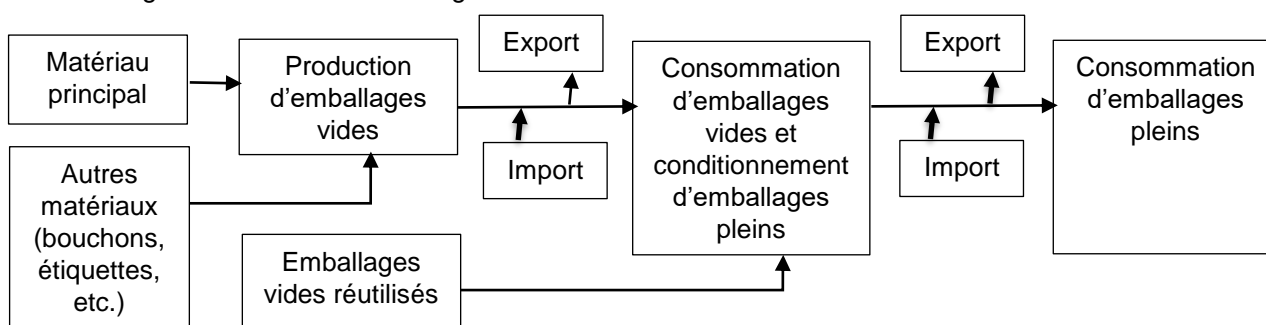


Figure 9 : Schéma type des flux d'emballages vides, pleins et réutilisés

Pour 2014, la cartographie des tonnages des emballages est regroupée sur le Tableau 18 : Production, Import, export pour le secteur des emballages vides et consommation d'emballages pleins et réutilisés en million de tonnes (ADEME, 2018).

La production concerne les emballages vides neufs composés du matériau brut prépondérant et des autres matériaux (bouchages, étiquettes, etc.). La consommation concerne celle des emballages pleins et les imports / exports cumulent le commerce d'emballages vides et pleins.

Tableau 17 : Production, Import export pour le secteur des emballages vides et consommation d'emballages pleins et réutilisés en million de tonnes (ADEME, 2018)

Type d'emballage (Mt)		Conso	Export	Import	Prod	Acier	Alu	Bois	Verre	Cartons	Plastiques
Acier	Acier usage unique	0,513	0,084	0,125	0,472	0,472					
	Autres matériaux	0,014			0,014		0,010			0,004	
	Emballages neufs en acier	0,527	0,084	0,125	0,486						
	Emballages réutilisés	0,315									
Aluminium	Aluminium usage unique	0,047	0,083	0,037	0,093		0,093				
	Autres matériaux	0,007			0,007						0,007
	Emballages neufs en alu	0,054	0,083	0,037	0,100						
	Emballages réutilisés	0,000									
Bois	Bois usage unique	2,287	0,212	0,634	1,865			1,865			
	Autres matériaux	0,002			0,002					0,002	
	Emballages neufs en bois	2,289	0,212	0,634	1,867						
	Emballages réutilisés	2,073									
Papier et carton	Papiers cartons usage unique	4,700	0,350	1,431	3,619					3,619	
	Autres matériaux	0,094		0,069	0,025		0,004				0,021
	Emballages neufs en papier carton	4,794	0,350	1,500	3,644						
	<i>dont cartons ondulés</i>	<i>2,718</i>	<i>0,216</i>	<i>0,356</i>	<i>2,578</i>						
	<i>dont cartons plats</i>	<i>0,830</i>	<i>0,054</i>	<i>0,352</i>	<i>0,532</i>						
	<i>dont papier</i>	<i>1,246</i>	<i>0,079</i>	<i>0,792</i>	<i>0,533</i>						
	Emballages réutilisés	0,000									
Plastique	Plastiques usage unique	2,021	0,445	0,658	1,808						1,808
	Autres matériaux	0,041			0,041		0,022			0,019	
	Emballages neufs en plastique	2,062	0,445	0,658	1,849						
	<i>dont sacs</i>	<i>0,421</i>	<i>0,065</i>	<i>0,188</i>	<i>0,298</i>						
	<i>dont boîtes, transport</i>	<i>0,332</i>	<i>0,236</i>	<i>0,234</i>	<i>0,334</i>						
	<i>dont bouteilles</i>	<i>1,049</i>	<i>0,144</i>	<i>0,224</i>	<i>0,969</i>						
	<i>dont films</i>	<i>0,260</i>	<i>0,000</i>	<i>0,012</i>	<i>0,248</i>						
	Emballages réutilisés (boîtes)	0,616									
Verre	Verre usage unique	2,732	1,872	1,379	3,225				3,225		
	Autres matériaux	0,007			0,007					0,007	
	Emballages neufs en verre	2,739	1,872	1,379	3,232						
	Verre réutilisé	0,200									
	TOTAL emballages neufs	12,466	3,046	4,334	11,178	0,472	0,129	1,865	3,225	3,651	1,836
	TOTAL emballages réutilisés	5,306									
	TOTAL emballages neufs + réu	17,772	3,046	4,334	11,178						

Les hypothèses relatives à l'évolution des quantités d'emballages sont détaillées dans les paragraphes suivants pour chaque filière. Les déterminants qui conditionnent cette évolution sont les suivants :

- **La sobriété** : par exemple la diminution des suremballages, l'accroissement du « service en vrac » dans les magasins, le développement des circuits courts, ou tout simplement la baisse de consommation de produits marchands, sont des facteurs qui entraînent une diminution des quantités.



- **L'accroissement** : à l'inverse, l'augmentation des plats préparés, de la restauration rapide ou les achats sur internet, sont des facteurs qui entraînent une augmentation des quantités.
- **La réutilisation** : si elle n'est pas possible pour tous les emballages, la réutilisation peut être accrue dans certains secteurs. Très présente aujourd'hui pour les palettes en bois, elle peut être développée pour les fûts et containers en acier ou en plastique ou pour les bouteilles et flacons en verre. La consigne est un levier pour favoriser la réutilisation.
- **La substitution** : pour un même usage, il est possible de substituer un matériau par un autre. C'est typiquement le cas des sacs en papier au lieu des sacs en plastique, mais aussi des bouteilles en verre au lieu des bouteilles en plastiques, les premières étant plus facilement réutilisables et plus facilement recyclables.

5.3.1. Les emballages en acier

Les emballages en acier comprennent :

- Les emballages non réutilisables (45 % de la consommation) à savoir les boîtes de conserve alimentaires et les boissons, les aérosols et les emballages industriels légers et destinés aux produits chimiques. A cela il faut ajouter le bouchage pour d'autres catégories (verre, plastique, etc.)
- Les emballages réutilisables (55 % de la consommation dont 17% neufs et 38% réutilisés) à savoir les fûts, les tonnelets, les IBC et les bouteilles de gaz.

L'activité est légèrement importatrice : le ratio production sur consommation (P/C) est de 0,92.

Pour les seuls emballages ménagers (environ 55%), l'ADEME avance une baisse de -0,9 % en 2030 vraisemblablement au profit de l'aluminium (ADEME, 2014).

En revanche le taux de réutilisation peut être accru pour les fûts, tonnelets, IBC et bouteilles de gaz. Aujourd'hui de 38 % sur l'ensemble de la filière, son potentiel est de 55 %.

5.3.2. Les emballages en aluminium

Les emballages en aluminium comprennent :

- Les emballages rigides à savoir les boîtes de conserve, les cannettes, les aérosols et les emballages industriels légers.
- Les emballages souples à savoir les tubes souples, les barquettes, les films qui comprennent l'aluminium utilisé comme revêtement par exemple dans les briques alimentaires en carton.

Avec son usine française de fabrication de cannettes, la filière est exportatrice nette (P/C = 1,85) aussi bien en vide qu'en plein.

100 % des emballages en aluminium sont considérés comme ménagers. Dans les exercices prospectifs précédents de l'ADEME, une hausse de 6,6 % en 2030 est envisagée (ADEME, 2014) correspondant à l'augmentation de population.

5.3.3. Les emballages en bois

Les emballages en bois comprennent :

- Les palettes et caisses palettes
- Les cagettes légères et les caisses
- Les tambours et tourets pour enrouler des câbles

Les palettes et tambours représentent environ² 43% de la consommation en neuf et 47% de la consommation de matériel réutilisé. Les emballages légers représentent 10% du total.

L'activité est légèrement importatrice (P/C = 0,82).

Il n'est pas envisagé de baisse de la demande à l'horizon 2050.

En revanche, le taux de réutilisation des palettes peut être augmentée et en 2050 (par rapport à 47% aujourd'hui).

5.3.4. Les emballages en papier et en carton

Les emballages en papier et en carton comprennent :

- Les emballages en carton ondulé destinés au transport de marchandises (57 % de la consommation)
- Les emballages en carton plat (17 % de la consommation) destinés au conditionnement de l'alimentation (briques, cellulose) et autres
- Les emballages en papier (26 % de la consommation) essentiellement pour des sacs.

² Une petite indétermination existe sur les importations d'emballages pleins (4% du total) qui ont été inclus dans les emballages lourds

L'activité est importatrice ($P/C = 0,76$) pour moitié à cause d'emballages vides (on fabrique moins de cartons en France qu'on n'en consomme) et pour moitié à cause d'emballages pleins (on importe en France des produits conditionnés en carton).

L'évolution des emballages en papier et cartons obéit à des logiques antagonistes résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 18 : Consommation papier graphique 2014 et évolution 2050

	Consommation papier graphique 2014		Evolution 2050		Remarques
	kt/a	%	%	kt/a	
Papier pour ondulé	3169	72%	0%	0	+ E-commerce (ADEME 2017 : +25% en 2030) - Augmentation durabilité des objets - développement des circuits courts
Papier emballage souple	318	7%	0%	0	+ substitution plastique + développement du vrac - réduction gaspillage
Cartons	942	21%	0%	0	
Total	4429	100%	0	0	

5.3.5. Les emballages en plastiques

Les emballages en plastique comprennent :

- Les sacs, sachets, pochettes en PE et en PVC ou autres (16% de la consommation)
- Les boîtes, caisses, casiers, palettes (dont pots de fleurs utilisés par les horticulteurs) (35 % de la consommation dont 12% en neuf et 23% en réutilisation)
- Les bonbonnes, bouteilles et flacons (39 % de la consommation) ainsi que les bouchons et couvercles.
- Les films plastiques essentiellement industriels, la production intégrée et autres articles (10 % de la consommation).

Sont exclus de la notion d'emballages les sacs poubelles, les cintres, les assiettes et tasses jetables vendues remplies, les bobines, fusettes canettes et autres supports similaire en plastique et les dosettes à café en plastiques.

L'activité est importatrice ($P/C = 0,90$).

La production de résines vierges à destination des emballages en 2014 est de 2079 kt (Plastics Europe), chiffre auquel il faut rajouter les résines recyclées estimées à 194 kt. La répartition est exposée dans le Tableau 61 : Répartition par interpolation du total des résines MPV et MPR. Le total de 1849 kt présenté dans le Tableau 18 est moindre sans qu'une explication satisfaisante n'ait pu être trouvée en dehors d'une perte de matière.

Dans l'étude (ADEME, 2014) une hausse de l'emballage plastique de 10,8% en 2030 est envisagée (voir ci-dessous).



Tableau 19 : Hypothèses ADEME sur les évolutions pour les emballages d'ici à 2030 (ADEME, 2014)

Facteur d'évolution	Évolution 2011/2030 retenue
Taille de la population	+ 9,6% (projection moyenne de l'INSEE)
Évolution de la consommation de produits	<p>Les principales tendances retenues sont (en % de la consommation par habitant) :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Progression du préemballé : forte pour les produits de panification sèches et fraîche (+90%), plus modérée pour les fruits et légumes frais (+15%) et la poissonnerie (+10%) ■ Progression de la consommation de produits transformés : surgelés et glaces (+40%), produits diététiques (+40%), confitures, fruits au sirop et compotes (+16%), conserve et plats préparés (+5%) ■ Une baisse de consommation pour certains produits lié en particulier aux questions de santé : vins (-15%), bières, panachés et cidres (-15%), tabac (-20%), huiles (-10%), beurre et graisse (-10%), sucre et édulcorants (-10%), viande, volaille et charcuterie (-10%) ■ Poursuite de la concentration des produits de lavage et d'entretien ménager (-20%) ■ Progression forte de la vente à distance et du drive (+ 90%) ■ Progression de la restauration rapide (+40%)
Évolution de la répartition des produits par matériaux d'emballages	<p>Essentiellement une progression de la part des emballages en plastique, par rapport aux autres matériaux d'emballages. Sur certains marchés diminution du plastique : progression du verre pour l'huile alimentaire et les produits de beauté et du carton pour les œufs.</p> <p>Pour les bières, panachés, cidres, et vins, diminution de la part des emballages en verre, au profit respectivement des emballages en métal et du « bag-in-box ».</p>
Évolution du taux de repas pris à domicile	Le nombre de repas pris hors domicile passe de 1 sur 7 en 2009, à 1 sur 5 en 2030, soit une part qui progresse de 14% à 20 %.
Taux de gaspillage alimentaire par les ménages	<p>Objectif Grenelle : gaspillage alimentaire divisé par 2</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Liquides : 2% -> 1% ■ Frais : 10% -> 5% ■ Épicerie : 4% -> 2%
Évolution de la quantité moyenne d'emballage par quantité de produits	<p>Pas d'évolution retenue car plusieurs facteurs se compensent :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Poursuite de l'écoconception des emballages par les industriels ■ Sensibilisation des consommateurs aux gestes de prévention

Ces hypothèses pourraient être modifiées pour tenir compte des éléments suivant :

- Le plastique n'a plus auprès du consommateur les vertus qu'il avait dans les années 60. Les déchets dans les océans, le risque de perturbateurs endocriniens, l'interdiction de certains emballages, contribuent au « Plastic Bashing » qui inquiète les industriels (Laurent ROUSSELLE, 2018)
- Le suremballage pourrait être diminué.
- L'accroissement du préemballé pourrait se faire au profit du papier ainsi que les sacs plastiques où une substitution vers le papier ou le plastique biosourcé s'est déjà opérée.

En termes de réutilisation, elle est à ce jour de 23 % pour les boîtes et de 0% sur le reste. Ces taux pourraient être améliorés d'ici 2050.

5.3.6. Les emballages en verre

Ce secteur regroupe les bouteilles, les flacons et les pots qui n'ont pas été distingués. Le taux de réutilisation est de 7% environ. Le secteur est globalement exportateur ($P/C = 1,18$). Il est à noter que la production d'emballages vides est de 3 232 kt et la consommation d'environ 4 000 kt. On importe donc 20% de bouteilles vides. Mais une fois le remplissage effectué, 32% part pour l'exportation. Ce taux de 1,18 correspond donc à un mouvement de va et vient important.

L'ADEME retient en 2030 une baisse des contenants en verre au profit du plastique de -12,4 % en vertu des critères exposés dans le Tableau 21.

Le verre se lavant mieux que le plastique il assure aux liquides une meilleure conservation.



5.4. BTP

5.4.1. Bâtiment - Construction neuve

Le rythme de construction en 2015 est calé sur les hypothèses du scénario ADEME (ADEME, 2017) elles-mêmes fondées sur les Scénarios prospectifs énergie-climat-air du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, scénario AME. Toutefois, les catégories de bâtiments ont été adaptées et complétées pour les besoins de la présente étude. Ainsi 5 catégories sont retenues pour les constructions neuves :

- les maisons individuelles, ou MI (diffuses et groupées),
- les logements collectifs et résidences, désignés ensemble par le terme Logements Collectifs (LC),
- les bâtiments tertiaires « CHEB » (Commerces de grande distribution, Hôtels, Enseignement et Bureaux administrations),
- les bâtiments tertiaires hors CHEB (Commerces hors grande surface, service public santé, culture loisir),
- les bâtiments industriels et agricoles, ou en abrégé « Indus / Agri »

Les statistiques sur la construction des autres bâtiments tertiaires et des bâtiments industriels et agricoles s'appuient sur les statistiques SIT@DEL (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire - Commissariat général au Développement durable, 2018).

Afin d'aligner les hypothèses sur l'année de référence de l'étude qui est 2014 et non 2015, un prorata d'évolution a été appliqué entre 2014 et 2015 selon les données SIT@DEL sur les données du scénario AME en 2015, pour les maisons et les logements collectifs. Pour les autres catégories les données de 2014 ont été utilisées directement.

	2014	2015	
MI (diffus+groupé)	169 005	157 940	(en nb de logts)
LC (et résidences)	176 321	180 880	(en nb de logts)
Tertiaire CHEB	6 815	6 815	(milliers de m ²)
Complément tertiaire	5 558	3 971	(milliers de m ²)
Complément industriel et agricole	11 470	11 372	(milliers de m ²)

Scénario AME →
SIT@DEL →

Figure 10 : Etat des lieux du rythme de construction en 2015 et en 2014 (année de référence de l'étude)

Par la suite, ne sont distingués que 4 catégories de construction : les maisons (MI), logements collectifs (LC), l'ensemble des bâtiments tertiaire (Tert.) et les bâtiments industriels et agricoles (Ind / Agri)

La construction résidentielle est établie en nombre de logements, il faut donc préciser la surface des logements. Nous nous sommes basés sur le rapport *Compte du logement 2015* (DATALAB, 2017), réalisé par DATALAB, à partir de données du CEREN :

2015	production en équivalent logement	Production en surface (m ²)	Surface moyenne (m ²)
individuel pur	103 405	12 612 637	122,0
individuel groupé	38 662	3 527 663	91,2
collectif	199 901	12 508 271	62,6
Total	341 968	28 648 571	83,8

Moyenne MI : 113,6

Cohérent INSEE

Figure 11 : Calcul des surfaces moyennes en résidentiel, d'après DATALAB

Ces valeurs sont globalement cohérentes avec les statistiques globales de l'INSEE (INSEE, 2017) : 81,3 m² moyens pour l'ensemble des logements en 2013³.

A noter que la surface moyenne par logement dans la construction neuve est supérieure à la moyenne du parc existant. Une valeur différente est donc prise en compte pour la partie rénovation (112,2 m² en MI et 63,0 m² en LC, source (INSEE, 2017)).

La morphologie des bâtiments a été établie :

- Pour le résidentiel : sur la base de l'étude Bâtiments résidentiels : Typologie du parc existant et solutions exemplaires pour la rénovation énergétique en France (POUGET Consultants, 2015),
- pour le tertiaire et les bâtiments industriels et agricoles : à dire d'expert

Pour le résidentiel, les moyennes pondérées des différentes typologies ont été reprises :

³ Pour mémoire nous raisonnons ici en m² habitables (SHAB). Ces valeurs sont donc logiquement inférieures à celles prises en compte dans l'Etude prospective sur la construction neuve (CSTB pour ADEME, 2018 (relecture en cours)) où les surfaces sont exprimées en m² SHON RT (123 m² pour les maisons individuelles de plain-pied et 148 m² à R+1, pour les maisons groupées respectivement 82 et 101 m², et pour les logements collectifs 68,5 m²)

- pour les maisons : les typologies Maison individuelle isolée d'après 2012 (« 10-SFH ») et Maison mitoyenne d'après 2012 (« 10-TH »),
- pour les logements collectifs. : Petit collectif d'après 2012 (« 10-MFH ») et Grand collectif d'après 2012 (« 10-AB »)

Les principaux paramètres de modélisation des mètres sont les suivants :

Paramètre	MI	LC	Source
Ratio Surface de plancher / SHAB	1,25	1,4	A dire d'expert (prise en compte des parties communes en LC)
Nombre moyen de niveaux	1,8	5,1	Typologie du parc existant et solutions exemplaires pour la rénovation énergétique en France (Base TABULA - Episcopes) (POUGET Consultants, 2015), croisé avec INSEE (INSEE, 2017) pour le logement collectif
% de garages en MI	93%		Source INSEE - Les conditions de logement en France, édition 2017 - (INSEE, 2017)
Nb parking / logt en LC		1	A dire d'expert, selon Règles Nationales d'Urbanisme
Surface place parking / surface totale de parking en collectif		50%	Mètres d'une opération suivie en tant que maître d'œuvre
% places boxées en parking collectif		50%	
Ratio Surface de menuiseries sur la SHAB	21%	17%	Typologie du parc existant et solutions exemplaires pour la rénovation énergétique en France (Base TABULA - Episcopes) (POUGET Consultants, 2015)

Figure 12 : Principaux paramètres de morphologie du secteur résidentiel, et sources

La cohérence de ces paramètres avec l'étude prospective sur la construction neuve réalisée par le CSTB (CSTB pour ADEME, 2018 (relecture en cours)), a été vérifiée. Cette dernière s'appuie sur la base de données OPE (base des calculs RT) et AQC. Le cas échéant, certaines valeurs (ratio de refends intérieur, ratio de cloisons) ont été utilisées en prenant bien soin de reconvertir la donnée au ratio m² SHAB et non m² SHON RT.

Pour les autres typologies de bâtiments, la même méthode a été reprise. N'ayant pas trouvé de bibliographie, des ratios à dire d'expert ont été établis. Les principaux paramètres sont les suivants :

Paramètre	Bâtiments tertiaires	Bâtiments industriels ou agricoles
Ratio Surface de plancher / SHAB	1,25	1,05
Nombre moyen de niveaux	3,6	1
Ratio longueur/largeur	1,4	1,4
Coefficient de mitoyenneté	75%	0
Ratio niveau de parking par niveau de surface utile	0,4	0
Ratio Surface de menuiseries sur la SHAB	35%	10%

Figure 13 : Principaux paramètres de morphologie des bâtiments des secteurs tertiaire et industriel/agricole

Le rythme de construction est le principal paramètre agissant sur les matériaux consommés par le secteur du bâtiment : il agit en multiplication sur tous les autres !

Le scénario Ademe (ADEME, 2017), lui-même adossé au scénario prospectif énergie-climat-air du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, scénario AME propose une trajectoire de rythme de construction neuve. Par ailleurs, l'évolution des surfaces construites en tertiaire hors CHEB et les bâtiments industriels et agricoles peuvent être extrapolées sur la base du scénario en tertiaire CHEB.



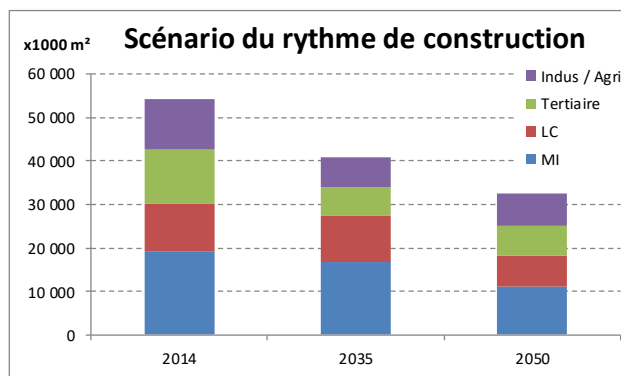


Figure 14 : scénario proposé d'évolution de la construction neuve, traduit en millier de m² / an

5.4.1.1. Procédés constructifs

Les procédés constructifs ont été quantifiés sur la base de la morphologie des bâtiments (mètres rapportés à la surface) et sur la base de parts de marché par mode constructif. Ces parts de marchés sont évaluées par typologie de bâtiment, et sont basées sur diverses sources bibliographiques, notamment :

- Enquête ForumConstruire.com sur les maisons individuelles, (ForumConstruire.com, 2016),
- Enquête nationale de la construction bois 2014 et 2016 (Cellule Economique de Bretagne pour FranceBoisForet et CODIFAB, 2017),
- Techniques de l'ingénieur, mars 2017, Principaux produits sidérurgiques - Aciers, applications et modes de production (BIRAT, Principaux produits sidérurgiques - Aciers, applications et modes de production / Réf. : M7020 V4 , 2017)
- Dossier de presse du Syndicat de la Construction Métallique en France de mars 2017 (SCMF - Syndicat de la Construction Métallique de France, 2017)
- L'acier dans la construction au regard du développement durable (DEVELOPPEMENT & CONSEIL, pour Ministère de l'Economie des Finances et de l'Industrie, 2005)
- Etude prospective sur la construction neuve réalisée par le CSTB (CSTB pour ADEME, 2018 (relecture en cours))
- Rapport BATINDUS (CTICM, CERIB, FCBA, CETIAT et LMDC Toulouse (financement ADEME), 2016).

Les parts de marchés prises en compte sont les suivantes :

	MI	LC	Tertiaire	Indus / Agri
Parpaings	50,8%	10,0%	4,0%	2,8% / 16,1%
Voile béton	1,6%	81,7%	74,0%	14,3% / 7,5%
Structure métal	1,8%	0,0%	12,0%	66,5% / 61,0%
Bois	9,7%	3,3%	2,0%	15,7% / 11%
Brique terre cuite	36,2%	5,0%	8,0%	0,5% / 5%
Géosourcé	0,0%	0,0%	0,0%	0% / 0%

Légende des sources
Enquête ForumConstruire.com
Enquête nationale construction bois
BATINDUS (2016)
Etude prospective sur la construction neuve réalisée par le CSTB pour l'Ademe (2018)

Figure 15 : Parts de marchés des procédés constructifs par typologie de bâtiment, et sources

A noter que pour les bâtiments Industriels et Agricoles, BATINDUS distingue les parts de marchés de la structure (premier chiffre dans le tableau ci-dessus) et celles du remplissage (second chiffre).

Le scénario Terracrea propose le développement de la construction bois, pour la superstructure (l'infrastructure et les fondations restent inchangés). Ce scénario BS++ est repris dans l'étude du CSTB sur la construction neuve (CSTB pour ADEME, 2018 (relecture en cours)) pour les logements et le tertiaire, et est extrapolé à partir du point de départ de BATINDUS (CTICM, CERIB, FCBA, CETIAT et LMDC Toulouse (financement ADEME), 2016) pour les bâtiments industriels et agricoles.

Les jalons en 2035 et 2050 sont présentées ci-après.

	2014	2035	2050
Maison individuelle	9,7%	15,0%	25,0%
Logement collectif	3,3%	10,0%	20,0%
Tertiaire	2,0%	5,0%	10,0%
Industriel et agricole	11,8%	20,0%	25,0%

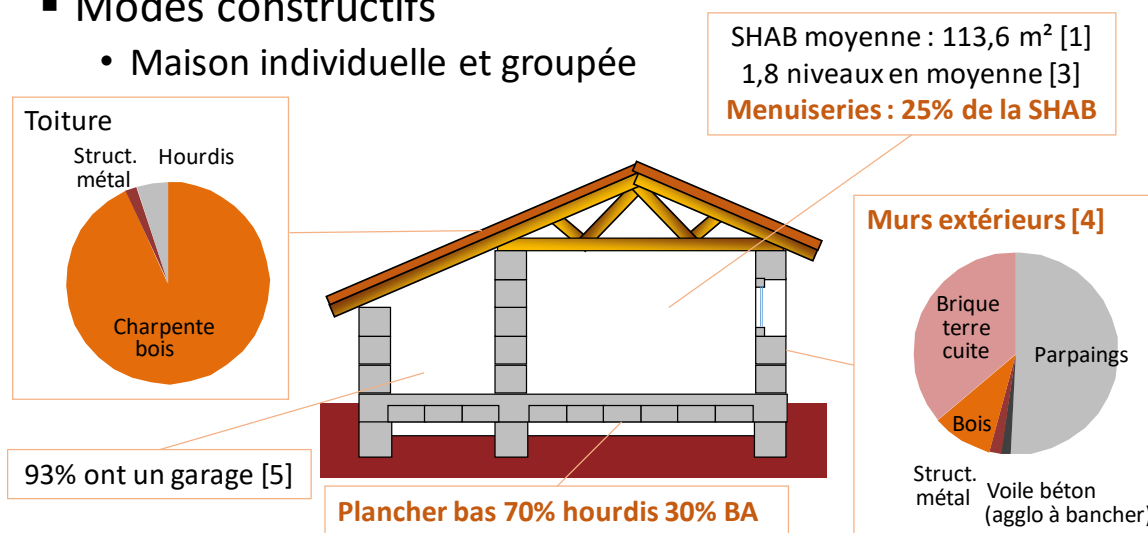
Source
 CSTB / TerraCrea
 CSTB / TerraCrea
 CSTB / TerraCrea
 Extrapolé sur la base de BATINDUS

Figure 16 : scénario d'évolution de la part de marché de la construction bois dans le neuf

Les travaux de prospective de l'ADEME ne prévoient pas à ce stade de développement du géosourcé (terre crue, adobe, pisé, terre coulée etc.).

De façon plus graphique, les principales hypothèses sont résumées sur les graphiques suivants :

■ Modes constructifs
 • Maison individuelle et groupée



[1] DATALAB, *Compte du logement 2014, à partir de données CEREN*

[3] déduit de *Bâtiments résidentiels, Typologie du parc existant et solutions exemplaires pour la rénovation énergétique en France*, POUGET Consultant pour ADEME et EU, 2015, basé sur TABULA / Episcopo

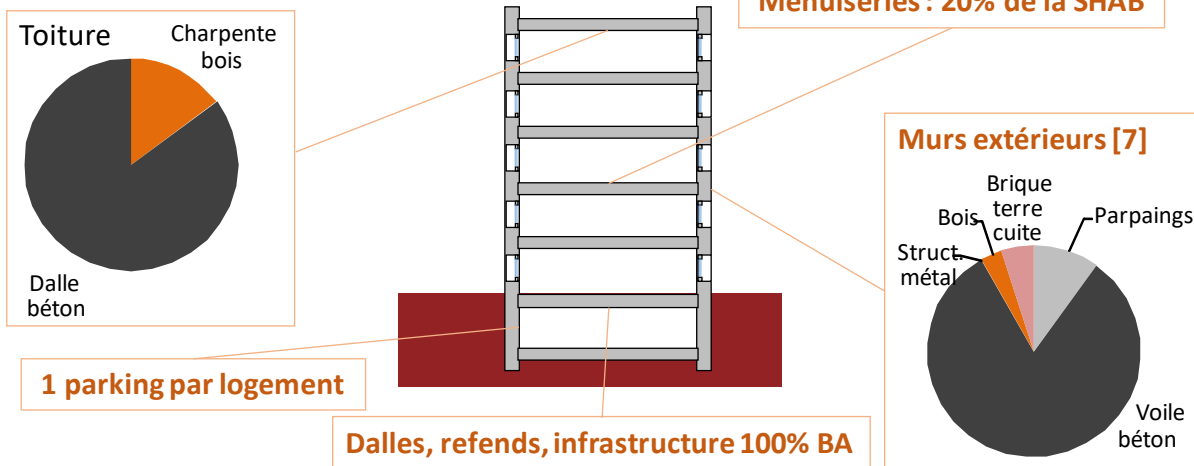
[4] Enquête ForumConstruire.com, décembre 2016, article sur Batiweb

[5] *Les conditions de logement en France, édition 2017 - Insee Références*

Figure 17 : résumé des principales hypothèses de modélisation des maisons individuelles et groupées



▪ Modes constructifs
• Logement collectif



[1] DATALAB, *Compte du logement 2014*, à partir de données CEREN

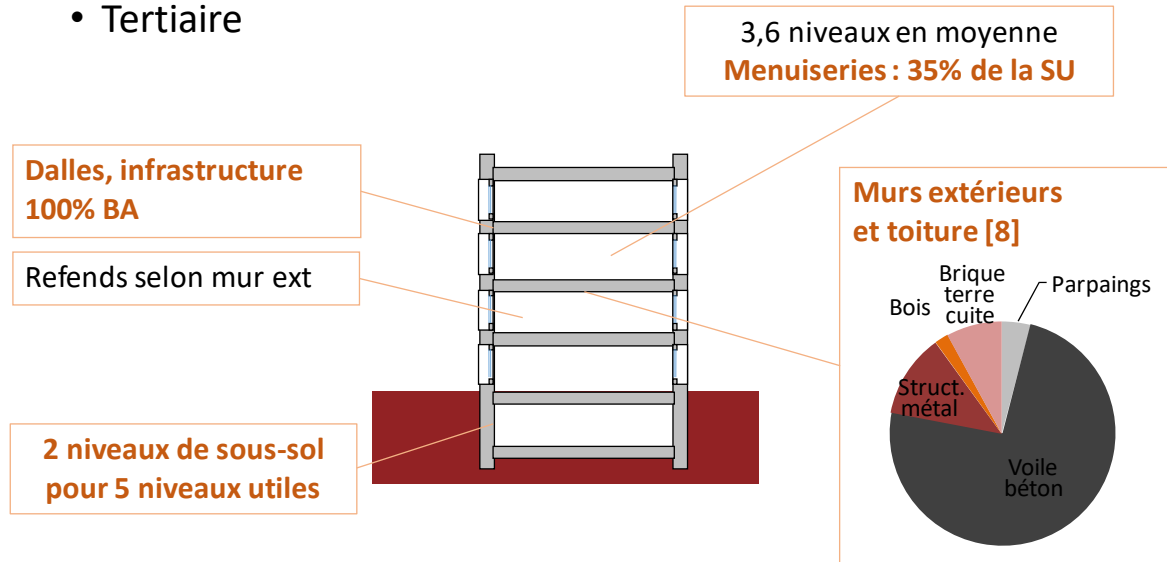
[3] déduit de *Bâtiments résidentiels, Typologie du parc existant et solutions exemplaires pour la rénovation énergétique en France*, POUGET Consultant pour ADEME et EU, 2015, basé sur TABULA / Episcopo

[6] INSEE et SDES (*enquête logement 2013*)

[7] D'après *Enquête construction bois 2014* ; sources diverses

Figure 18 : résumé des principales hypothèses de modélisation des logements collectifs

▪ Modes constructifs
• Tertiaire

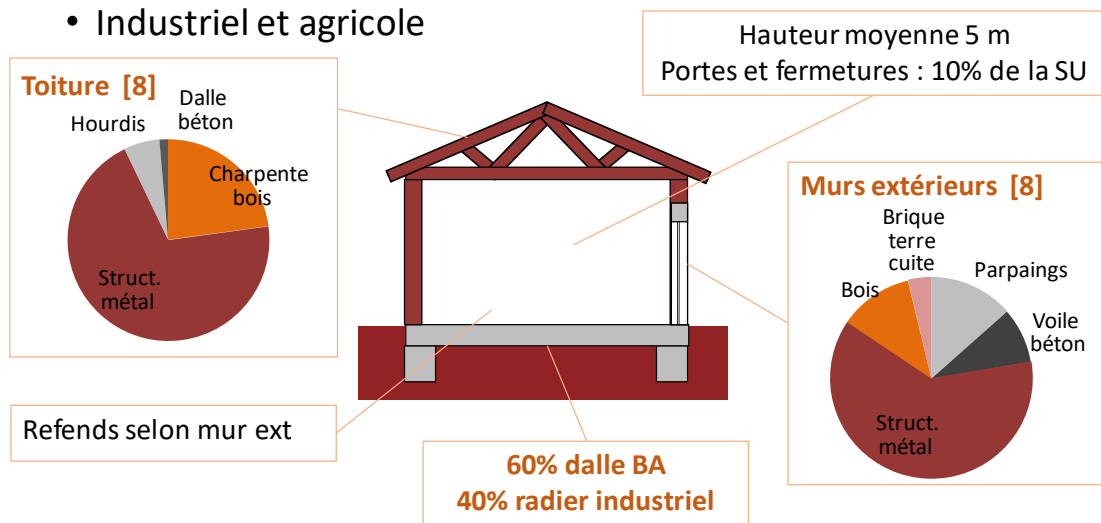


[8] D'après *Enquête construction bois 2014* ; *Techniques de l'ingénieur*, mars 2017, *Principaux produits sidérurgiques - Aciers, applications et modes de production* ; et Sit@del2

Figure 19 : résumé des principales hypothèses de modélisation des bâtiments tertiaires

■ Modes constructifs

• Industriel et agricole



[8] D'après Rapport BATINDUS pour ADEME, octobre 2016

Figure 20 : résumé des principales hypothèses de modélisation des bâtiments industriels et agricoles

5.4.1.2. Menuiseries

Dans le panorama des modes constructifs actuels, on note également les **parts de marché des différents matériaux de menuiseries** : les données suivantes sont issues de BatiEtudes (BatiEtudes, relayé sur Tokster, 2016) :

Evolution -Matériau des fenêtres	2000 %	2002 %	2004 %	2006 %	2008 %	2010 %	2012 %	2015 %
Bois	19,9	17,9	16,8	14,7	13,7	13,0	13,0	11,0
PVC	61,6	63,1	63,8	64,1	63,3	62,4	60,7	60,5
Aluminium	16,9	17,4	17,7	19,2	21,1	22,4	23,3	26,0
Mixte	0,1	1,4	1,5	1,8	1,7	2,0	2,7	2,3
Acier			n.s	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
Total (milliers d'unités)	9464	10183	10843	12275	12155	11670	11112	10185

Figure 21 : répartition du marché des menuiseries par matériaux (Source : BatiEtudes, publié sur tokster.com)

En revanche, la distinction de ces parts de marché par typologie de bâtiment n'a pas pu être établie.

Dans l'outil, par souci de simplicité, les menuiseries mixtes sont regroupées avec les autres, et les menuiseries acier sont négligées (mais les portes et fermetures en acier ont bien été prises en compte).

Par ailleurs, n'ayant pas trouvé de données sur les parts de triple vitrage en construction neuve, et sachant que cette part est marginale, il a été retenu 100% de double vitrage en 2014.

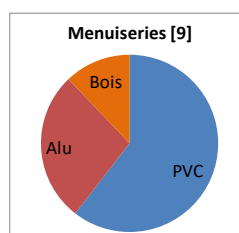


Figure 22 : répartition simplifiée du marché des menuiseries par matériaux intégrée dans l'outil



5.4.1.3. Isolants

Les parts de marché des isolants en construction neuve et les résistances thermiques moyennes par parois ont été établies à dire d'expert sur la base de la pratique d'ENERTECH en tant que maître d'œuvre et AMO. Les masses d'isolant ont été calculés sur une conductivité et une masse volumique moyenne. La cohérence des volumes totaux par type d'isolant a été vérifiée, en ajustant notamment les parts de marchés pour arriver à une bonne concordance.

Le détail des hypothèses prises en compte sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Parois	Résistance thermiques (m ² .K/W)	Isolant	Conductivité (W/m.K)	Masse volumique (kg/m ³)	MI	LC	Tertiaire	Indus / Agri
Toiture	R = 7	Polyuréthane	0,024	34	5%	78%	50%	25%
		PSX	0,035	30	0%	5%	10%	25%
		Laine de roche	0,038	35	10%	5%	30%	25%
		Laine de verre	0,038	30	71%	10%	10%	25%
		Ouate	0,042	25	14%	2%	0%	0%
Plancher	R = 3	Polyuréthane	0,024	34	30%	20%	10%	10%
		PSX	0,035	30	70%	10%	20%	90%
		Flocage	0,042	30	0%	70%	70%	0%
Murs	R = 4	PSE	0,035	20	60%	80%	70%	0%
		Laine de roche	0,035	35	10%	10%	20%	60%
		Laine de verre	0,032	30	30%	10%	10%	40%
		Biosourcé	0,038	60	0%	0%	0%	0%

Figure 23 : détail des hypothèses concernant les isolants en construction neuve (en 2014)

Les lignes grisées correspondent à des matériaux qui ne sont pas modélisés dans le cadre de la présente étude.

En termes de perspective les dernières évolutions réglementaires tendent à renforcer l'isolation des bâtiments. A l'avenir, le triple vitrage pourrait se développer et les niveaux d'isolation moyens être augmentés.

5.4.1.4. Revêtements de sol

Pour les **revêtements de sol, notamment au PVC** (les autres matériaux n'étant pas modélisés pour les besoins de l'étude), le recoupement de plusieurs articles (notamment sur <http://www.cote-sols.fr> (SFEC – syndicat français des enducteurs calendriers, 2012) et www.businesscoot.com (Businesscoot, 2016)) permet d'estimer les volumes de sols souples PVC en neuf à 10 millions de m², sachant que le total des revêtements de sol tout confondus est de 200 millions de m² par an, dont 42 millions de m² pour le neuf, sur lequel les sols souples PVC ont une part de marché de 25%. On extrapole ainsi ces 25% à l'ensemble du marché neuf et rénovation.

Les autres revêtements de sol (carrelage, plancher) sont modélisés sur la base d'hypothèses complémentaires, mais les matériaux concernés ne sont pas concernés par la présente étude.

Outre le PVC, des sols souples alternatifs (linoléum, mais aussi caoutchouc) ont été également introduits pour permettre des hypothèses de substitution dans les scénarii. Leur part de marché a été supposée nulle en 2014.

5.4.1.5. Bardages

Concernant les bardages, plusieurs sources ont été recoupées (notamment BATINDUS (CTICM, CERIB, FCBA, CETIAT et LMDC Toulouse (financement ADEME), 2016), BardageInfo #4 (Adeline DIONISI, 2013) et Batirama (Batirama, 2016). Le recouplement des volumes et des parts de marché, mis en relation avec nos estimations à dire d'expert par typologie de bâtiment, nous ont amené aux hypothèses suivantes :

	MI	LC	Tertiaire	Ind / Agri	Mm ²	Part relative
Bardage en neuf	1,3	0,7	3,5	4,3	9,8	
dont Bois	0,6	0,1	0,2	0,6	1,4	15%
Acier	0,1	0,1	0,7	3,4	4,4	45%
Alu	0,1	0,4	1,8	0,0	2,2	23%
Autres	0,5	0,1	0,9	0,3	1,7	18%
Bardage en réno	6,2	1,3	4,2	0,0	11,7	
dont Bois	2,8	0,1	0,2	0,0	3,1	27%
Acier	0,6	0,3	0,8	0,0	1,7	15%
Alu	0,6	0,6	2,1	0,0	3,4	29%
Autres	2,2	0,3	1,1	0,0	3,5	30%
Total bardage	7,4	2,0	7,8	4,3	21,5	

Figure 24 : répartition du marché des bardage par matériaux intégrée dans l'outil (MI : maison individuelle, LC : logement collectif)

NB : la catégorie « Autres » comporte les bardages fibrociment, résine, terre cuite etc. Nous n'avons pas pu obtenir d'information pour quantifier ces différentes filières.

5.4.1.6. Autres lots de second œuvre

Bien que hors périmètre des matériaux pris en compte pour la présente étude, les plaques de plâtre utilisés en doublage intérieur et en cloisons ont été modélisées afin de quantifier les masses de rails métalliques ou d'ossatures bois pour plaques de plâtre.

Il a été fait l'hypothèse simplificatrice selon laquelle il a autant de systèmes de plaques de plâtre sur ossature bois qu'il n'y a de bâtiments à ossature bois dans chaque typologie.⁴

Il a également été retenu un ratio de 2 kg/m² de Polypropylène et de 2 kg/m² de Polyéthylène, ainsi que 11 kg/m² d'acier, qui sont nécessaires pour arriver à chacune des statistiques globales attendues.

5.4.1.7. Systèmes

Les hypothèses se basent sur une opération de logements collectifs jugée représentative les quantités de tubes d'évacuation rapportées au m² SHAB. Ce ratio a été extrapolé à la maison individuelle. Dans le tertiaire ce ratio a été réduit de moitié, et a été négligé en bâtiment industriel et tertiaire. En 2014 nous avons considéré que 100% de ces tubes étaient en PVC. La quantité totale de tubes PVC (en neuf + rénovation) calculée étant plus faible que la quantité statistique globale du PVC consommé (Plastics Europe, 2014), ce ratio a été finalement majoré de 60%.

De même un ratio pour les tubes acier a été calculé (pour les installations de chauffage notamment), sur la base de trois opérations de logement collectifs dont ENERTECH a réalisé l'analyse de cycle de vie (ACV) détaillée. Ce ratio a été extrapolé aux maisons individuelles et au tertiaire.

Pour mémoire les centrales de ventilation et les chaudières sont considérées dans les statistiques Eurostat (référence pour l'outil au niveau global) comme des biens de consommation et équipements (BEC), donc en dehors du périmètre du module bâtiment. Ils n'ont pas été modélisés ici.

5.4.1.8. Substitutions de matériaux

En termes de perspective, les tendances suivantes semblent se détacher :

- La réduction de l'usage du PVC, en raison de son impact environnemental : réduction des parts de marchés en menuiseries, dans les tuyaux d'évacuation et dans les sols souples,
- Réduction de l'usage du Polystyrène et du Polyuréthane en raison de leur nocivité notamment en cas d'incendie, et en lien avec le renforcement de la réglementation incendie,

⁴ Le flux des rails métalliques pour plaque de plâtre a été identifié à part dans l'onglet « MatBat » (résultats ligne 517) car il s'agit d'acier galvanisé, soit un procédé de protection contre la rouille particulièrement impactant sur le plan environnemental. Ce flux est toutefois regroupé avec le reste de l'acier par la suite



- Développement de l'usage des isolants biosourcés en toiture et en murs,
- Développement de l'usage du bois en bardage.

A noter que certaines de ces évolutions ne sont pas décrites dans les travaux prospectifs de l'ADEME.

Dans le détail **pour le PVC**, l'étude de TBC sur la rénovation (TBC pour ADEME, 2018 (relecture en cours)) suppose une évolution du marché défavorable aux menuiseries PVC en raison de son fort impact environnemental, qui sera de plus en plus perceptible par la diffusion de l'analyse de cycle de vie dans le bâtiment, à commencer par la prise en compte de l'impact climatique dans la construction dans la future RE2020.

Ces menuiseries en PVC sont remplacées par des menuiseries bois et aluminium au prorata de leur part de marché actuelle.

La substitution du PVC dans les sols souples et tubes d'évacuation n'est pas prise en compte dans la prospective ADEME.

Le **développement des isolants biosourcés** peut être appréhendé grâce à l'étude du CSTB sur la construction neuve (CSTB pour ADEME, 2018 (relecture en cours)), elle-même basée sur le scénario BS++ de Terracréea.

	2014	2035	2050
Part de marché des isolants biosourcés en mur	0%	15%	30%
Part de marché des isolants biosourcés en toiture charpente bois (hors toits plats et charpentes métalliques)	15%	25%	35%

Figure 25 : développement des isolants biosourcés

Ces scénarii ne concernent toutefois que l'isolation des toitures en neuf et en rénovation, en MI, LC et tertiaire, mais pas sur les bâtiments industriels et agricoles.

Enfin **le développement de l'usage du bois pour les bardages** peut également s'appuyer sur l'étude du CSTB sur la construction neuve (CSTB pour ADEME, 2018 (relecture en cours)), elle-même basée sur le scénario BS++ de Terracréea.

		2014	2035	2050
Part de marché du bardage bois	MI	45%	48%	52%
	LC	10%	31%	35%
	Tertiaire	5%	10%	15%
	Indus/Agri	14,3%	20%	25%

Figure 26 : développement du bardage bois

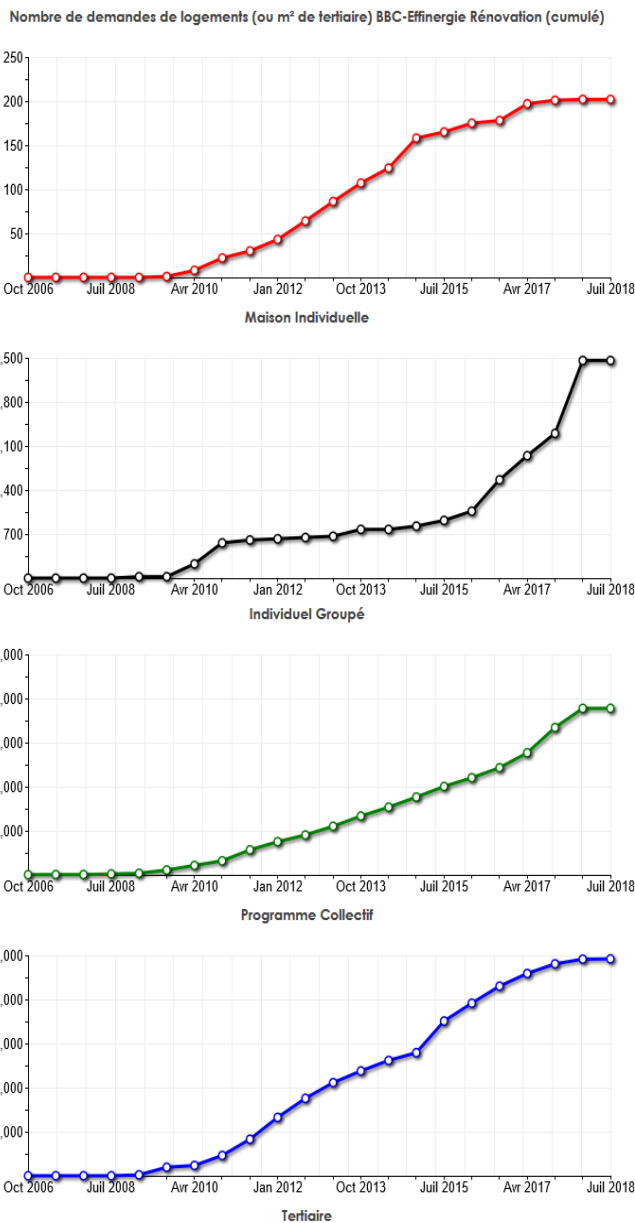
5.4.2. Bâtiment – Rénovation

Dans la modélisation, sont distinguées les rénovations « Bâtiment Basse Consommation » (BBC) et les rénovations non BBC. En effet, d'une part les travaux et matériaux mis en œuvre ne sont pas les mêmes dans les deux cas, mais également il est important de pouvoir rapprocher le modèle des objectifs nationaux comme les 500 000 logements rénovés par an (MTES, 2017) et l'objectif de la loi de transition énergétique : « de disposer d'un parc immobilier dont l'ensemble des bâtiments sont rénovés en fonction des normes "bâtiment basse consommation" ou assimilées, à l'horizon 2050, en menant une politique de rénovation thermique des logements concernant majoritairement les ménages aux revenus modestes » (Titre I, paragraphe III-7).

La **rénovation BBC** a été modélisée sous la forme de rénovations globales, c'est-à-dire que sont réalisés l'isolation des murs, toitures et planchers bas, ainsi que le remplacement des menuiseries. La mise en œuvre d'une ventilation et d'un système de chauffage performants fait aussi partie du bouquet de travaux, mais n'a pas été modélisée au sein du module bâtiment. En effet, les statistiques Eurostat utilisées comme source au niveau global considèrent ces équipements comme des biens de consommation et équipements (BEC), donc en dehors du périmètre du module bâtiment.

En pratique, les rénovations BBC peuvent être réalisées de façon globale ou par étapes – ce débat fait l'objet d'autres études par ailleurs – mais en tout état de cause, les quantités de matériaux sont sensiblement identiques quelle que soit la façon de procéder. Ces deux approches n'ont donc pas été différenciées.

Le rythme de rénovation BBC en 2014 est basé sur les statistiques de l'observatoire BBC (Effinergie, Consulté en 2018) :



Nous tirons de ces graphiques une tendance entre 2010 et 2017 de :

650 maisons individuelles et groupées par an (principalement en individuel groupé)

15 000 logements par an en collectif

Et 450 milliers de m² par an en bâtiment tertiaire.

Figure 27 : historique des rénovations BBC (Source : observatoire BBC d'Effinergie)

Ces hypothèses tendent probablement à sous-estimer le nombre de rénovations à un niveau BBC car elles ne prennent en compte quasiment que les rénovations BBC certifiées. La réalité est sans doute sensiblement plus élevée, notamment en maison individuelle du secteur diffus et en copropriétés. Aucune statistique fiable n'a cependant été identifiée sur ce sujet. Cette incertitude doit être relativisée : le rythme actuel de rénovation BBC est dans tous les cas très loin du rythme pour atteindre un parc immobilier au niveau BBC ou assimilé en 2050. C'est cette évolution qui est clé dans le modèle.

La **rénovation non BBC** regroupe tous les autres "gestes" de rénovation, énergétique ou non, réalisés de façon diffuse. Ces rénovations peuvent contribuer à améliorer la performance énergétique, mais pas dans une approche globale conçue de façon cohérente avec l'objectif BBC. On retrouve donc dans cette forme de rénovation à la fois des reprises de gros œuvre, des remplacements de couverture ou de finition de sol, des remplacements de réseaux fluides et des travaux d'isolation et de remplacement de menuiseries.

NB : dans la scénarisation de la massification des rénovations BBC, le rythme attribué aux rénovations BBC sera déduit des postes de travaux énergétiques de la rénovation non BBC. **Cette hypothèse traduit le fait que la massification de la rénovation BBC va se substituer aux gestes de rénovation non coordonnés, pour leur donner une cohérence globale (en une fois ou par étapes), et non s'y ajouter. Inversement les travaux non**



énergétiques restent pris en compte dans la rénovation non BBC, et ne sont pas modélisés en rénovation BBC afin de ne pas créer de doublon.

Le rythme de la rénovation non BBC des logements est basé sur les statistiques OPEN (ADEME, Travaux achevés en 2014). Pour l'année 2014 : 2 450 000 gestes en maison individuelle et 1 050 000 gestes en logement collectif, dont 35% concernent le remplacement des fenêtres, 31% l'isolation des murs et 30% l'isolation des toitures.

On note que ces 3,5 millions de « gestes » de rénovation concernent chaque année 11% du parc de logement, soit un « geste » tous les 10 ans environ en moyenne. A défaut de statistique comparable pour les bâtiments tertiaires, il a été supposé par prudence un rythme deux fois plus faible, soit un « geste » tous les 20 ans en tertiaire, soit 46 550 milliers de m² concernés par une action de rénovation chaque année.

La rénovation des bâtiments industriels et agricoles (Ind / Agri) n'a pas été envisagée.

Les rythmes de rénovation du parc résidentiel BBC et non BBC sont établis en nombre de logements, il faut donc préciser la surface des logements. Il s'agit ici de la surface moyenne du parc existant, et non de la surface des logements neufs. Sur la base du rapport « Les conditions de logement en France » (INSEE, 2017), la surface moyenne est de 112,2 m² en maison individuelle et 63,0 m² en logement collectif. Pour mémoire, ces surfaces sont inférieures aux surfaces moyennes en construction neuve.

La morphologie des bâtiments est supposée identique à celle prise en compte pour la construction neuve.

En termes de perspective, l'ADEME propose une massification de la rénovation BBC dans son scénario dit « BBC » (ADEME, 2017). A noter que les hypothèses de ce scénario ont été communiquées sous la forme de rythme moyen de rénovation sur les périodes 2018 – 2034 et 2035 – 2050. Une hypothèse a été faite pour retrouver ces valeurs moyenne avec un scénario de croissance linéaire du rythme de rénovation. Pour que ce scénario ne comporte pas un pic trop élevé suivi d'une baisse de rythme, une valeur cible intermédiaire a été retenue en 2030.

On obtient ainsi le scénario de rénovation du parc de logement suivant :

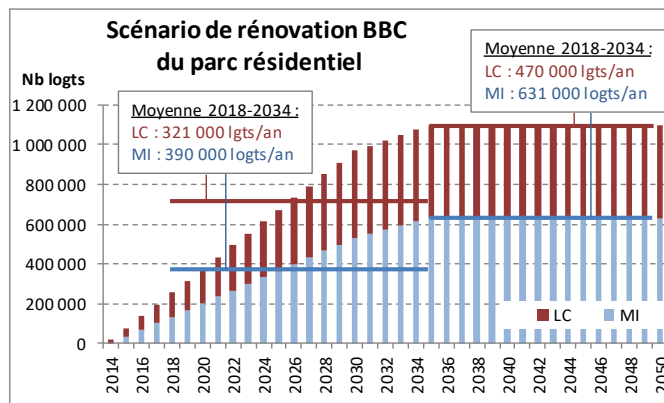


Figure 28 : scénario de rénovation BBC du parc résidentiel, en nombre de logement

Pour mémoire, on atteint le rythme de 500 000 logements par an rénovés BBC en 2023, et on atteint un rythme constant de 1,1 million de logements par an en 2035. Au total, entre 2014 et 2050 ce sont plus de 25 millions de logements qui sont rénovés, **soit plus que le nombre de logements d'avant 1975** (21 millions) ou encore plus de 80% du parc d'avant 2000 (30 millions de logement). **Ces chiffres sont donc cohérents avec l'objectif de rénover la totalité du parc au niveau BBC.** Pour être atteint, cet objectif nécessite une massification rapide de la rénovation très performante (au niveau BBC).

Pour le tertiaire la dynamique du logement collectif (évolution en %) peut être extrapolée avec comme point de départ le rythme de rénovation BBC estimé en 2014. Cette projection est donc assez fragile et mériterait d'être confortée.

5.4.2.1. Procédés constructifs

Ceux-ci n'ont à priori pas d'incidence sur la rénovation. En revanche, les statistiques spécifiques à la rénovation sur l'usage du ciment pour « l'entretien de bâtiments » (voir Figure 51) nous amène à prendre en compte d'importantes reprises de gros œuvre pour atteindre ces volumes de béton.

Il a été fait l'hypothèse d'une reprise de chapes (dans 10% des « gestes » de rénovation non BBC), et de la réalisation de dalles ou voiles béton avec les ferrillages associés (dans 7,9% des « gestes » en maison individuelle et la moitié en logement collectif et tertiaire, ces valeurs ayant été ajustées pour reboucler la quantité de ciment totale de ce poste).

5.4.2.2. Menuiseries

Le marché de la menuiserie est porté en large majorité par la rénovation, comme l'illustre la figure ci-après (Etude TBC relayée sur BatiWeb, (TBC, 2017)) :

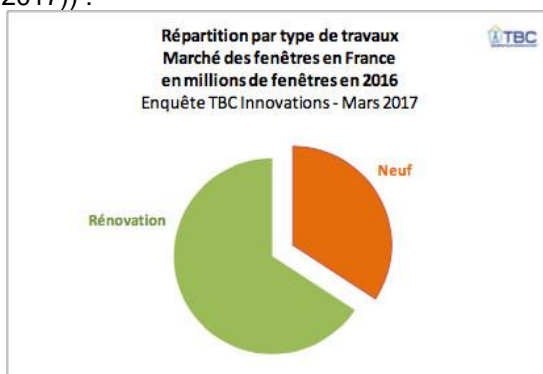


Figure 29 : répartition du marché des menuiseries (source : TBC, cité sur batiweb)

Pour la **rénovation non BBC**, la même répartition de parts de marché par matériaux qu'en neuf a été utilisée.

Pour la **rénovation BBC**, nous disposons des statistiques de l'observatoire Effinergie (Effinergie, Consulté en 2018) et de leur publication « Observatoire BBC, Retour d'expérience, la rénovation basse consommation » (Effinergie, 2016) :

	MI	LC	Tertiaire
PVC	35%	60%	10%
Alu	25%	15%	55%
Bois	40%	25%	35%

Figure 30 : répartition des parts de marché en rénovation BBC (source : Effinergie)

Concernant le triple vitrage, deux sources contradictoires ont été identifiées :

- l'étude sur la rénovation réalisée par TBC (TBC pour ADEME, 2018 (relecture en cours)) indique 2% en moyenne pour l'ensemble des logements,
- le retour d'expérience du dispositif « Je Rénove BBC » en Alsace (CEREMA, 2017) basé sur un échantillon de 500 rénovations BBC mentionne 15% de triple vitrage en maison individuelle rénovées BBC

Dans la mesure où cette dernière source est sans doute spécifique au climat de l'Est de la France, nous avons privilégié la première source, mais en fléchant le triple vitrage sur la maison individuelle uniquement (soit 5% en MI et 0% en LC).

En rénovation non BBC, le triple vitrage n'a pas été pris en compte.

5.4.2.3. Isolants

Les parts de marché des isolants en rénovation sont supposés identiques à la construction neuve pour la **rénovation non BBC**. Les niveaux d'isolation pratiqués sont ceux de la construction neuve réduits forfaitairement de 25%.

Pour la **rénovation BBC**, les données de l'Observatoire BBC (Effinergie, Consulté en 2018) (MI, LC et tertiaire) ont été croisées avec celles de l'étude réalisée par TBC sur la rénovation des logements (TBC pour ADEME, 2018 (relecture en cours)).



Le tableau suivant en présente une synthèse :

Parois	Résistance thermiques (m ² .K/W)	Isolant	Conductivité (W/m.K)	Masse volumique (kg/m ³)	MI	LC	Tertiaire	Indus / Agri
Toiture	R = 7,5	Polyuréthane	0,024	34	5%	40%	35%	NC
		PSX	0,035	30	3%	20%	10%	NC
		Laine de roche	0,038	35	22%	25%	30%	NC
		Laine de verre	0,038	30	50%	10%	15%	NC
		Ouate	0,042	25	20%	5%	10%	NC
Plancher	R = 3	Polyuréthane	0,024	34	16%	15%	10%	NC
		PSX	0,035	30	60%	13%	20%	NC
		Laine de verre	0,038	30	7%	0%	20%	NC
		Autre (LdR, Flocage)	NC	NC	17%	72%	50%	NC
Murs	R = 4,5 en MI et 3,8 en LC et tertiaire	PSE	0,035	20	42%	65%	35%	NC
		Laine de roche	0,038	35	13%	15%	25%	NC
		Laine de verre	0,032	30	30%	15%	25%	NC
		Biosourcé	0,038	60	15%	5%	15%	NC

Figure 31 : détail des hypothèses concernant les isolants en rénovation BBC (en 2014)

Les lignes grisées correspondent à des matériaux qui ne sont pas modélisés dans le cadre de la présente étude. Par ailleurs, la rénovation des bâtiments industriels et agricoles n'a pas été modélisée.

5.4.2.4. Revêtements de sol

D'après businesscoot (Businesscoot, 2016), 200 millions de m² de sols sont posés chaque année. Si l'on soustrait les 42 millions de m² SHAB de logements et tertiaire neuf, il reste 158 millions de m² par an remplacés en rénovation, **soit 40% des « gestes » de rénovation non BBC.**

Sur la base des mêmes sources que celles utilisées pour les bâtiments neufs, ces volumes ont été répartis en parts de marché. Les parts de marché des sols souples ont cependant été majorés pour tenir compte de leur facilité de pose, critère de choix décisif en rénovation en site occupé. La cohérence avec le volume total neuf + rénovation a été vérifiée (50 millions de m² répartis en 10 millions de m² en neuf et 40 millions de m² en rénovation).

Ce poste n'a pas été pris en compte en rénovation BBC.

5.4.2.5. Bardages

Les parts de marché en **rénovation non BBC** sont identiques à celles du bâtiment neuf.

Pour la rénovation BBC, l'étude réalisée par TBC sur la rénovation des logements (TBC pour ADEME, 2018 (relecture en cours)), permet de préciser les valeurs pour le segment de la rénovation BBC des logements.

5.4.2.6. Systèmes

Le remplacement des systèmes en **rénovation non BBC** est modélisée sur la même base que pour les bâtiments neuf (voir §5.4.1.7). L'hypothèse émise est que 10% des « gestes » allaient affecter ces postes.

A noter que ce poste n'est pas repris en **rénovation BBC**. En effet, pour les besoins de la présente étude, les réfections de réseaux d'évacuation et de chauffage n'ont pas été intégrés au périmètre de la rénovation énergétique, mais comme opération de maintenance lourde.

5.4.2.7. Substitution de matériaux

En termes de prospective, les substitutions de matériaux envisageables pour la rénovation non BBC peuvent être imaginées comme identiques à celles de la construction neuve.

Pour la **rénovation BBC**, les pratiques actuelles dans le recours à des isolants biosourcés sont souvent plus « vertueuses » que les pratiques de la construction neuve. C'est pourquoi il est possible d'imaginer conserver les parts de marché d'isolant biosourcés observées actuellement dans le BBC jusqu'à ce que le taux de biosourcé scénarisé en construction neuve ne la rattrape. Lorsque c'est le cas, les pratiques de la rénovation BBC suivent la pratique en construction neuve lorsqu'elle devient plus vertueuse.

Par exemple, ceci est particulièrement visible pour la part de marché du biosourcé dans l'isolation des murs en maison individuelle, où les rénovation BBC commencent à 15% contre 0% dans la pratique courante dans la figure ci-contre.

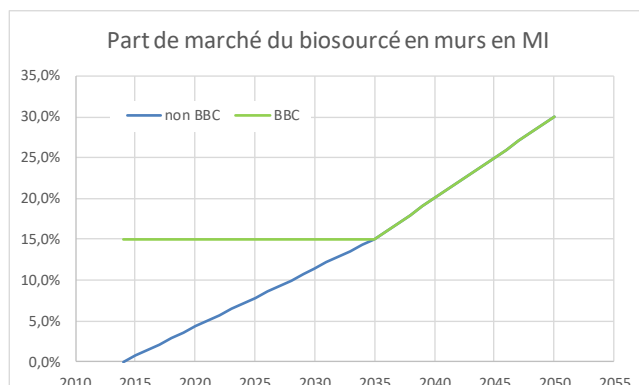


Figure 32 : comparaison de l'évolution de la part de marché du biosourcé en murs en maison individuelle entre la rénovation BBC et la rénovation non BBC

5.4.3. Travaux publics

5.4.3.1. Routes

Le paramètre déterminant pour modéliser la construction des routes est le nombre de km construits par type de route en distinguant les autoroutes, les routes nationales, départementales et communales, conformément à la nomenclature du document DATALAB, Les infrastructures linéaires de transport : évolutions depuis 25 ans (DATALAB, 2016).

Dans ce même document, le rythme moyen de **construction de nouvelles routes** entre 2005 et 2014 est de 89 km/an d'autoroutes, 67 km/an de routes nationales, 2144 km/an de routes départementales et 7 000 km/an de routes communales.

Les quantités de béton ont été affectées à chaque type de route au prorata de la largeur de la route. Pour les autoroutes nous avons basé le calcul sur le graphique suivant issu des Chiffres clés 2011 de l'ASFA (ASFA, 2011) :

Répartition par nombre de voies autoroutières

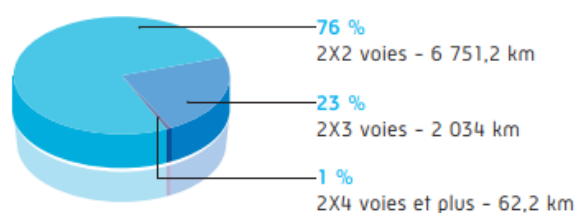


Figure 33 : répartition par nombre de voies des autoroutes (source : ASFA)

La largeur moyenne retenue est de 2 voies pour les routes nationales, 1,5 pour les routes départementales et 1,2 pour les routes communales.

Les éléments en béton comme les barrières d'autoroute, et les séparateurs sur certaines nationales ont été pris en compte.

Nous avons en outre réparti les volumes d'aluminium pour les routes avec une forte pondération sur les autoroutes (notamment pour la signalétique), et estimé les volumes de polyéthylène pour les balises et musoirs (au niveau des sorties d'autoroute).

Bien que cela soit hors du périmètre de la présente étude, nous avons également décrit les volumes de granulats, sables et bitume pour la construction des routes (sur la base de différentes sources (notamment le site de l'UNPG (UNPG - Union nationale des producteurs de Granulats, Consulté en 2018) et par répartition des volumes globaux du secteur.



En termes de perspective, le rythme de construction de route doit rester cohérent avec donc hypothèses sur le transport notamment. La poursuite de la tendance actuelle entrainerai augmentation des km construits est de +13% en 2035 et +25% en 2050 par rapport à 2014. Dans le scénario « InW », il est préconisé une diminution des km construits avec un moratoire sur la construction d'autoroutes en 2035. Le scénario de l'ADEME (ADEME, 2017) ne propose pas d'hypothèse sur le sujet.

La part modale du béton dans la construction des routes, a été prévue dans la modélisation. Elle est quasiment inexistante en 2014, mais certains acteurs anticipent un développement possible (notamment si l'industrie pétrochimique est fortement ralentie par la fin du pétrole bon marché et que le bitume n'est plus disponible). Les partisans de cette solution lui voient une part de marché de 5% maximum à horizon 2035 (retour recueilli lors du séminaire organisé dans le cadre de cette étude en septembre 2018).

5.4.3.2. Voies ferrées

L'évolution du nombre de km construits a été modélisé par type de ligne : nous avons distingué les lignes LGV (à 2 voies), les autres lignes (ramenées le cas échéant en équivalent 2 voies), lignes de métro et RER et lignes de Tramway. La même source (DATALAB, 2016) a permis d'évaluer le rythme moyen de construction à 44 km/an de LGV, 33 km/an d'autre ligne de train (à 2 voies), 11 km/an de lignes de métro ou RER, et 44 km/an de lignes de tramway.

Les quantités de béton préfabriqué (traverses notamment) et autres bétons ont été estimées à dire d'expert. Le recollement avec la statistique du poste voies ferrées a été validé.

Les masses d'acier nécessaires pour les rails eux-mêmes, les traverses et les poteaux des caténaires, ainsi que de l'aluminium pour la signalétique (TGV et train uniquement) ont été estimées par calcul.

Pour mémoire, les volumes de granulats ont été pris en compte, sur la base du site de l'UNPG cité précédemment. Tout comme pour les routes, les perspectives de développement de voies ferrées sont liées aux perspectives du transport.

5.4.3.3. Ouvrages d'art

Ce poste regroupe en principe les ouvrages d'art liés aux transports (ponts, tunnels), mais aussi les ouvrages énergétiques classiques et renouvelables. Ces derniers sont modélisés dans le Module énergie dont la description se retrouve à la partie 5 de ce rapport.

Aucune donnée n'a été trouvée pour les différents usages au sein de ce secteur. Nous avons donc procédé par soustraction des volumes de matières modélisés pour les EnR, et pour les deux postes restants nous avons supposé que 90% des matériaux étaient liés à des ouvrages d'art pour les transports, et 10% autres⁵.

Les quantités de matériaux des 90% sont corrélés au prorata des km construits en routes et voies ferrées. Les 10% restant sont supposés fixes quel que soit le rythme de construction de routes et de voies ferrées.

Les volumes totaux ont été obtenus :

- à partir des données Infociments 2008 (CIM Béton, ATILH et Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, 2008) (voir Figure 62 du § 7.3.2.2.3) pour le béton,
- par déduction et par ratio, les fers à béton associés (3% en masse, basé sur le constat de 2% en moyenne dans le bâtiment, majoré de 50% vue la technicité des ouvrages d'art),
- à partir des données Eurostat pour les autres aciers (EUROSTAT 2014, Ouvrages d'art en construction métallique, codes NAF 25112100 et 25112310),
- Eurostat également pour la construction aluminium (EUROSTAT 2014, Construction aluminium, code NAF 25112370).

Pour mémoire nous avons également décrit les volumes de granulats, sur la base des données de l'UNPG (« L'industrie française des granulats en 2014 » (UNPG, 2015)) et par soustraction des autres postes concaténés ensemble (204 Mt en 2014 pour « Travaux routiers et ferroviaires, VRD*, endiguement et autres usages pour infrastructures).

5.4.3.4. VRD

⁵ Ces valeurs sont modifiables dans l'outil onglet MatTP, cellule E26



Les travaux de Voiries et Réseaux Divers (VRD) incluent notamment les aménagements de parcelles qui ne sont pas dans le périmètre de la construction des bâtiments.

Les volumes de béton, fers à béton tubes acier, tubes PVC et PE, ainsi que les granulats et le sable ont été estimés à dire d'expert par calcul sur la base de la viabilisation d'un terrain de 1000m² devant accueillir 4 maisons individuelles totalisant 400 m² SHAB, avec une route centrale et tous les réseaux associés (réseau principal et desserte des maisons).

5.4.3.5. Divers

Nous avons choisi de faire apparaître explicitement un poste divers, dans lequel on regroupe des soldes de quantité de matière qui n'ont pu être fléchées précisément sur un usage, dans un volume qui nous semble cohérent. **C'est donc une façon d'explicitier notre marge d'incertitude** sur le secteur somme toutes peu documenté des TP.

Dans les graphiques suivants illustrant les quantités des principaux matériaux du BTP, ce poste « divers » est indiqué en violet (le cas échéant avec son homologue du bâtiment) :

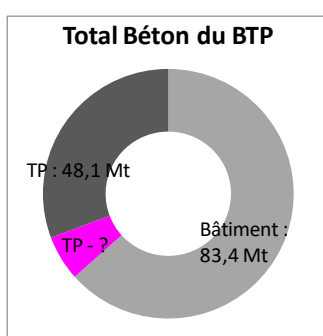


Figure 34 : résultat de la modélisation du BTP pour le béton : la part non précisément identifiée est de 6%

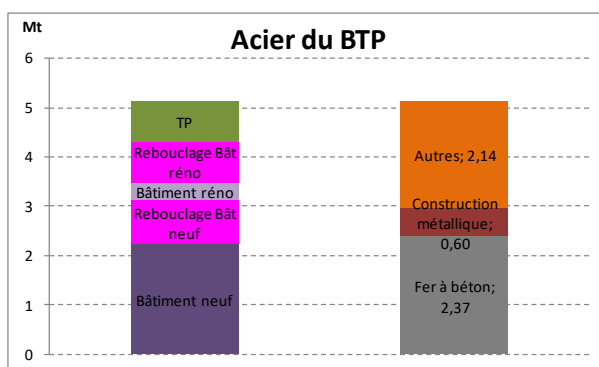


Figure 35 : résultat de la modélisation du BTP pour l'acier : la part non précisément identifiée est de 34% (dans le bâtiment neuf et rénové)

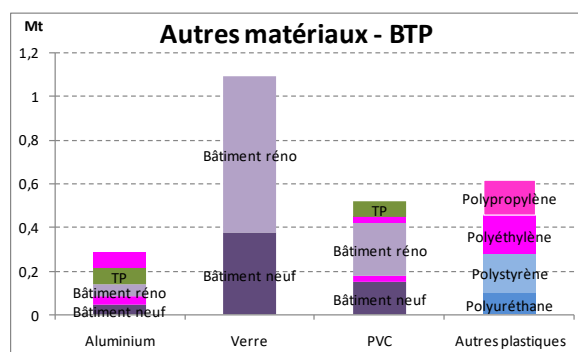


Figure 36 : résultat de la modélisation du BTP pour l'aluminium, le verre, le PVC et les autres plastiques : les volumes non précisément identifiés représentent respectivement 37%, 0%, 10% et la totalité du PE et PP)



Le tableau suivant récapitule les volumes par matériaux pour les travaux publics (TP) en 2014 :

		Mt (2014)
BETON	Total Routes	16,42
	Total Rail	0,43
	Total Ouvrages d'art et énergie	11,03
	Total VRD	13,36
	Total divers	6,83
	total Mt	48,07
ACIER	Total Routes	0,000
	Total Rail	0,058
	Total Ouvrages d'art et énergie	0,745
	Total VRD	0,301
	Total divers	0,205
	total Mt	1,31
ALUMINIUM	Total Routes	0,00055
	Total Rail	0,000
	Total Ouvrages d'art et énergie	0,076
	Total VRD	0,000
	Total divers	0,100
	total Mt	0,177
PVC	Total VRD	0,076
	Total divers	0,000
	total Mt	0,08
Polyéthylène	Total Routes	0,000
	Total Rail	0,000
	Total Ouvrages d'art et énergie	0,000
	Total VRD	0,024
	Total divers	0,000
	total Mt	0,02

Figure 37 : résultat de la modélisation de l'année 2014 pour les différents matériaux du secteur des TP

5.5. Production d'énergie

Selon la vision ADEME 2035 – 2050 (ADEME, 2017), les principaux ouvrages nécessaires à la production énergétique aujourd'hui et d'ici 2050 sont :

1. Les activités liées aux combustibles fossiles
 - Les raffineries de pétrole
 - Les réseaux de gaz et les réservoirs de stockage
 - Les centrales électriques thermiques
2. L'industrie nucléaire
 - Les centrales électriques,
 - Le traitement des déchets
 - Les activités liées au démantèlement
3. Les énergies renouvelables
 - Les barrages hydroélectriques
 - Les champs d'éoliennes (sur terre et en mer)
 - Les capteurs photovoltaïques en toiture des habitations et en centrale au sol
 - L'industrie de la méthanisation avec ses différents procédés
 - La mobilisation de la biomasse comme combustible ou carburant alternatif
4. Les activités de transformation des vecteurs énergétiques
 - La cogénération
 - L'industrie de l'électrolyse, production d'hydrogène et méthanation

Au vu des objectifs de la COP21 et de la volonté affichée de sortir la France des énergies fossiles à l'horizon 2050, les activités liées aux combustibles fossiles ne sont pas amenées à se développer.

Certes, l'entretien et la maintenance des équipements requièrent une certaine quantité de matériaux. Dans le cadre de cette étude, ces quantités sont supposées incluses dans la maintenance actuelle globale des activités de travaux publics. Cette dernière remarque s'applique également aux barrages hydroélectriques.

L'industrie nucléaire se caractérise aujourd'hui par la construction de nouvelles unités EPR en remplacement de celles qui vont fermer et pour des travaux liés à la prolongation de certaines unités existantes. A cela s'ajoutent les activités liées au démantèlement et à l'enfouissement des déchets de longue durée de vie.

A ce jour, aucune donnée permettant une cartographie de ces activités à l'année de référence n'a été identifiée. Pour la prospective, s'ajoute la difficulté des incertitudes liées au rythme du démantèlement et de la construction de nouvelles tranches.

Il est possible que l'avancement du programme SURFER⁶ permette de dégager des éléments répondant à ces interrogations. Dans cette étude, faute de mieux, ces activités sont intégrées au sein des grands ouvrages d'art des Travaux publics sans les détailler.

Pour les énergies renouvelables (hormis l'hydroélectricité), un fort développement est prévisible au moins dans trois domaines que nous détaillons dans les paragraphes suivants : l'éolien, le photovoltaïque, et la méthanisation.

L'évolution de la consommation de matériaux liées au développement de la biomasse énergie n'a pas été modélisée dans le cadre de cette étude.

Il reste la question des transformations d'énergie : cogénération, électrolyse et/ou de la méthanation. Le vecteur hydrogène est pressenti à l'horizon 2050 car il permet l'équilibre des réseaux électriques soumis à la variabilité des énergies renouvelables⁷. L'hydrogène est également pressenti pour suppléer le gaz ou le charbon dans certaines activités industrielles (chimie, sidérurgie). Il est également pressenti pour produire du gaz (méthanation) et ce dernier peut redevenir électricité par le biais de la cogénération. Dans le cadre de cette étude, ces nouvelles installations n'ont pas été évaluées.

⁶ Projet en cours, porté par le CNRS, le BRGM et l'ADEME, qui vise entre autres à estimer les besoins en ressources minérales associés à la transition vers une énergie bas carbone

⁷ A noter qu'aucune capacité de méthanation a été considérée à l'horizon 2030 dans la Vision ADEME 2030 – 2050 de 2013



5.5.1. L'éolien

En 2014, la puissance éolienne cumulée est de 9 313 MW avec une progression annuelle de 1 156 MW/an qui amorce un redémarrage de l'activité après une certaine stagnation au début de la décennie.

Dans son exercice de prospective « vision 2030-2050 », (ADEME, 2017) l'ADEME propose le rythme de développement suivant :

Tableau 20 : Développement de l'éolien d'ici 2050 - (ADEME, 2017)

			2014	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
TOTAL EOLIEN			9 313	19 220	28 593	38 074	47 556	57 037	66 519	76 000
dont terrestre	Cumul	MW	9 313	17 720	24 259	30 407	36 556	42 704	48 852	55 000
dont offshore	Cumul	MW	-	1 500	4 333	7 667	11 000	14 333	17 667	21 000
TOTAL neuf + repowering	Annuel	MW/an	1 156	1 860	2 255	3 086	2 895	3 756	4 152	4 983
dont terrestre	Annuel	MW/an	1 156	1 360	1 589	2 420	2 229	2 590	2 818	3 649
dont offshore	Annuel	MW/an	-	500	667	667	667	1 167	1 333	1 333
TOTAL repowering	Annuel	MW/an	-	-	359	1 190	999	1 860	2 256	3 087
dont terrestre	Annuel	MW/an	-	-	359	1 190	999	1 360	1 589	2 420
dont offshore	Annuel	MW/an	-	-	-	-	-	500	667	667
TOTAL Neuf	Annuel	MW/an	1 156	1 860	1 896	1 896	1 896	1 896	1 896	1 896
dont terrestre	Annuel	MW/an	1 156	1 360	1 230	1 230	1 230	1 230	1 229	1 229
dont offshore	Annuel	MW/an	-	500	667	667	667	667	666	666

La construction est ici divisée en deux types : la construction neuve et le repowering c'est-à-dire le remplacement de l'unité arrivée en fin de vie (supposée égale à 20 ans pour tous les modèles). Lors du remplacement, on considère que la même quantité de matériaux est consommée que pour une unité neuve.

La récupération des matériaux issus de l'ancienne installation obéit aux hypothèses suivantes :

- Récupération des métaux ferreux et non ferreux dans le cycle général
- Pas de récupération des plastiques et verre contenus dans les pales. Des recherches sont en cours sur cette possibilité mais elles ne sont pas assez avancées pour qu'on puisse les prendre en considération.
- Dans la majorité des installations, la machine neuve est de taille différente de l'ancienne et le béton n'est pas réutilisable en tant que tel pour les fondations. C'est cette hypothèse qui est retenue. En revanche, ce béton peut être recyclé sous forme de granulats comme l'ensemble des ouvrages de génie civil en déconstruction.

On constate que le rythme de la construction est amené à doubler en 2030 et tripler en 2050. Il est donc utile d'analyser les conséquences en termes de consommation de matériaux.

L'unité fonctionnelle choisie est le MW et les consommations de matériaux requises sont les suivantes :

Tableau 21 : Bilan matières des typologies d'éoliennes (CYCLECO, ADEME, 2015)

Tonne / MW installé	Terrestre	Offshore posé	Offshore flottant
Acier/métaux ferreux	140	320	356
Ciment/béton	156	378	240
Granulats	312	567	480
Plastiques	4,18	6,08	6,08
Verre	6,82	9,92	9,92
Aluminium	2	2	2
Cuivre	3	10	10

On peut remarquer que deux technologies de l'éolien offshore sont présentées ici : l'éolien posé ou ancré et l'éolien flottant. Cette distinction n'apparaît pas dans le tableau des puissances car la prospective ADEME suppose que l'éolien flottant n'est pas développé.

La plupart des matériaux constitutifs sont importés comme l'indique le tableau ci-dessous :

Tableau 22 : taux d'importation des éléments constitutifs des éoliennes (ADEME, 2017)

	NCE	NAF	CPA	Import	Source mentionnée dans le rapport
Hypothèse Etudes préliminaires		71.12B	CPA_M71	10%	Enquête
Etudes de construction		71.12B	CPA_M71		
Mâts	29	25.11Z	CPA_C25	80%	Données constructeurs
Pales	32	28.11Z	CPA_C28	95%	Hypothèse
Composants structure	32	28.11Z	CPA_C28	95%	Hypothèse
Gros composants électriques	31	27.11Z	CPA_C27	95%	Hypothèse
Composants électriques	30	26.51B	CPA_C26	75%	Enquête : 50% à 75% (Schneider ?)
Assemblage			CPA_F	0%	Hypothèse
Génie civil		43.12	CPA_F	0%	Hypothèse
Raccordement		42.22Z	CPA_F	0%	Hypothèse

Les facteurs d'importation décrits étant basés sur des hypothèses, il semble inopportun de détailler le commerce international de la construction du parc éolien. Par souci de simplification, il a été retenu un taux global d'importation de 90% sur l'ensemble de la filière, soit un rapport P/C (Production/consommation) de 0,1.

5.5.2. Le photovoltaïque

En 2014 la puissance photovoltaïque cumulée a été de 5 297 MW. Les 2/3 environ à savoir 3 588 MW sont installés en toiture et sont pour majorité de petites installations dans des habitats individuels ou collectifs. Le reste concerne les centrales au sol de taille plus conséquente. La progression annuelle en 2014 a été de 931 MW supplémentaires pour moitié en toiture et moitié au sol.

Dans son exercice de prospective « vision 2030-2050 », (ADEME, 2017) l'ADEME propose le rythme de développement illustré dans le Tableau 23

On remarquera qu'à partir de 2030, une partie du PV installé 20 ans auparavant doit être remplacé (repowering). La quantité de matériaux utilisés concerne donc le parc neuf plus le parc remplacé. Cependant on peut estimer que les matériaux issus du parc remplacé suivent une filière de recyclage qui permet leur réutilisation, à l'exception notable du béton.

Tableau 23 : Perspective d'évolution de production photovoltaïque (ADEME, 2017) et dire d'expert ADEME

Puissance PV			2014	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
TOTAL INSTALLE (neuf + Repowering)	Annuel	MW/an	931	1 800	2 622	3 302	3 516	4 422	5 244	5 924
Dont PV au sol	Annuel	MW/an	445	1 100	1 000	1 863	2 399	3 017	3 578	4 041
Dont PV sur toiture	Annuel	MW/an	486	700	1 622	1 439	1 118	1 406	1 667	1 883
REPOWERING	Annuel	MW/an		0	0	680	894	1 800	2 622	3 302
Dont PV au sol	Annuel	MW/an	0	0	0	439	610	1 228	1 789	2 253
Dont PV sur toiture	Annuel	MW/an	0	0	0	241	284	572	833	1 050
TOTAL NEUF	Annuel	MW/an	931	1 800	2 622	2 622	2 622	2 622	2 622	2 622
Dont PV au sol	Annuel	MW/an	445	1 100	1 000	1 424	1 789	1 789	1 789	1 789
Dont PV sur toiture	Annuel	MW/an	486	700	1 622	1 198	833	833	833	833
TOTAL PV	Cumulé	MW	5 297	13 800	24 444	37 556	50 667	63 778	76 889	90 000
Dont PV au sol	Cumulé	MW	1 709	7 000	12 000	18 224	27 168	36 112	45 056	54 000
Dont PV sur toiture	Cumulé	MW	3 588	6 800	12 444	19 331	23 499	27 666	31 833	36 000

Les matériaux utilisés pour le photovoltaïque sont les suivants :

Tableau 24 : Bilan matière du photovoltaïque (Données ADEME)

Tonnes / Mwc	PV au sol	PV en toiture
Acier/métaux ferreux	104,7	9,5
Ciment/béton	15,4	0,0
Verre	54,0	68,0
Aluminium	86,5	42,5
Cuivre	3,0	3,0



5.5.3. La méthanisation

La méthanisation permet de produire du biogaz par la dégradation de matière organique (déchets ménagers, fumiers, déchets agricoles, etc.) en absence d'oxygène. Après une épuration poussée qui permet d'atteindre les spécifications du gaz naturel, le biogaz peut être appelé biométhane et, dans certaines conditions être injecté dans le réseau de distribution ou de transport de gaz naturel.

Outre le biogaz, une unité de méthanisation peut générer de l'électricité par cogénération et l'unité fonctionnelle (UF) pertinente est l'énergie primaire produite chaque année.

Les publications précédentes de l'ADEME en termes de prospective énergétique ADEME (ADEME, 2017) ne contiennent pas de détails sur l'évolution année par année de l'énergie primaire produite par les installations de méthanisation comme pour le PV et l'éolien. La production est explicitée uniquement pour les années 2030 et 2050.

La production en 2014 a donc été interpolée sur des données relatives à des années voisines.

Tableau 25 : Evolution de la production des unités de méthanisation d'ici 2050 (ADEME, 2017)

GWh primaire		2014	2035	2050
A la ferme	codigestion	815	16 486	22 567
	autonome		23 301	32 446
Déchets ménagers		174	2 450	2 494
En industrie		-	75	357
En station d'épuration (step)		1 162	1 360	1 404
Centralisé	individuel multi déchets	568	1 071	1 291
	grand collectif agricole		2 998	4 184
	petit collectif agricole		17 674	23 038
TOTAL		2 719	65 416	87 782

Les quantités de matériaux nécessaires à la construction des unités est déduit de la base Ecoinvent (v2.2) sur la base différentes typologies de système de production. Elles sont appliquées aux différences de production entre l'année n+1 et l'année n en supposant que les unités construites sont immédiatement opérationnelles.

Le rythme de production supplémentaire considéré est ainsi détaillé ci-dessous :

Tableau 26 : Hypothèse pour la production additionnelle annuelle en GWh EP pour la méthanisation

Type de méthaniseurs	Augmentation par an entre 2014 et 2035	Augmentation par an entre 2036 et 2050
A la ferme	1 856	1 088
Déchets ménagers	108	3
En industrie	4	20
En station d'épuration (STEP)	9	3
Centralisé	1 008	484
Installation de Stockage des Déchets non Dangereux (ISDND)	238	-

Les caractéristiques des systèmes considérés sont les suivants :

Tableau 27 : Caractéristiques des typologies de méthaniseurs modélisés

		Procédé ecoinvent considéré	Capacité annuelle	Production Nm3/an	Production EP GWh/an
A la ferme	codigestion	anaerobic digestion plant, agriculture	300 m3	65 000	0,419
	autonome				
Déchets ménagers		anaerobic digestion plant, biowaste	10 000 t	1 000 000	6,468
En step		anaerobic digestion plant, sewage sludge		913 000	5,903
Centralisé, en industrie	individuel multi déchets	anaerobic digestion plant covered, agriculture	500 m3	104 000	0,665
	grand collectif agricole				
	petit collectif agricole				

Tableau 28 : Composition matière des méthaniseurs en kg/GWh/an

kg/GWh/an	Acier	Alu	Béton	Plastiques
A la ferme	1 500	-	40 900	100
Déchets ménagers	1 100	-	16 400	-
En industrie	1 100	-	16 400	-
En step	100	-	3 300	-
Centralisé	1 600	-	39 100	300



5.6. Transport

Le secteur du transport représente un tiers des consommations d'énergie finale et c'est le premier émetteur de CO₂ en France. Il occupe donc une place centrale dans les scénarios énergétiques.

Le module transport s'attache à modéliser les implications de l'évolution des besoins de mobilité et de transport de marchandise sur les besoins de matériaux.

Le schéma ci-dessous explicite l'approche utilisée. Celle-ci permet de gérer simultanément plusieurs paramètres pouvant soit réduire la consommation de matériaux associée à la production des véhicules (ex. allongement de la durée de vie des véhicules par rapport à la moyenne actuelle) soit l'augmenter (ex. augmentation du nombre de km.voyageurs parcourus).

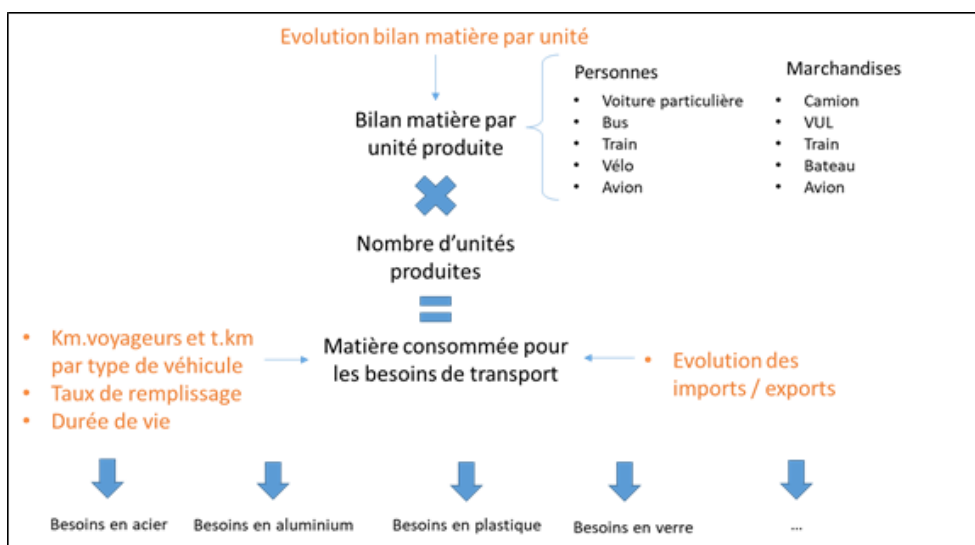


Figure 38 : approche utilisée pour la modélisation du secteur des transports

Cette approche pourrait être améliorée en intégrant un modèle de stock dans lequel les parcs de véhicule seraient décrits en spécifiant :

- Une description des années de construction
- Une durée de vie moyenne

Cela permettrait d'en déduire les années de mise au rebut pour chaque type de véhicule. Les données identifiées à ce jour ne permettent pas de consolider un tel modèle.

L'approche utilisée est schématisée dans la figure suivante. Les paramètres sont utilisés pour ajuster les matières consommées pour les besoins de transport selon une règle de proportionnalité. A titre d'illustration : une augmentation de 10% de la durée de vie moyenne des véhicules entraînera une réduction de 10% des consommations de matières associées. Si en parallèle les km.voyageurs augmentent de 10%, la combinaison des deux paramètres entraîne une stabilité de la consommation de matière.

5.6.1. Granulométrie et paramètres pris en compte

Les typologies de transport considérées sont les suivantes :

- Transport de personnes
 - Véhicules particuliers⁸ (VP)
 - Thermiques
 - Electriques
 - Bus
 - Bateau
 - Train
 - Avion
 - 2 roues motorisées
 - Vélo

⁸ A noter que pour les 9 matériaux considérés dans cette étude, la distinction véhicule thermique / électrique n'est pas discriminante. Cependant, dans une perspective d'étendre les matériaux pris en compte ce découpage est rendu possible par l'outil.

- Transport de marchandises
 - Véhicules Utilitaires Légers (VUL)
 - Poids lourds
 - Train
 - Avion
 - Bateau

Pour chacun de ces modes de transport, le modèle permet de prendre en compte les paramètres suivants pour modéliser l'évolution des besoins à l'échelle nationale :

- Les **km.voyageurs** pour le transport de personnes et **t.km** pour le transport de marchandises : ce paramètre permet à la fois de rendre compte
 - de l'évolution des parts modales entre les modes de transport (est-ce que j'utilise ma voiture ou mon vélo quand je fais un déplacement par ex.)
 - des kilomètres parcourus pour chaque mode : les politiques d'urbanismes pour réduire les besoins de déplacement (ex. arrêt de construction de nouvelles zones commerciales en péri-urbain) peuvent être ainsi prises en compte
- le **taux de remplissage des véhicules** : pour une même quantité de personnes ou de marchandises déplacées, l'optimisation du remplissage permet de réduire les besoins en matière du mode de transport utilisé⁹
- la **durée de vie du véhicule** : plus la durée de vie du véhicule est grande plus les besoins matières pour un même déplacement sont réduits
- le **poids unitaire du véhicule** par capacité de transport (par nb de voyageurs pour transport de personnes, par tonnage transporté pour le transport de marchandises)
- l'évolution de l'**importation** et **exportation** des équipements de transports
- l'évolution de la **composition matière** des véhicules en pourcentage massique

5.6.2. Données considérées

5.6.2.1. Production des véhicules

Le bilan des import-export s'appuie sur les données Eurostat pour l'année 2014 (EUROSTAT, 2014). Ci-dessous sont compilées les premières données consolidées :

Tableau 29 : Nombre d'unités par an - Consolidation des données (EUROSTAT, 2014)

Mode de transport	Exportation	Importation	Production
Vélo	383 175	2 291 205	523 133
2 roues	127 034	371 041	103 336
Bus/Car	2 095	5 283	2 721
Train personnes	667	5 078	320
Voiture	1 735 884	1 971 802	1 964 082
Avion - personnes	86	146	400
Transport fluvial - personnes	23 603	20 210	5 275
VU léger	208 528	193 718	338 321
Poids lourds	50 292	58 094	13 627
Train - marchandises	667	5 078	320
Transport fluvial - marchandises	-	-	10 072

La figure ci-dessous rend compte des incertitudes associées aux volumes de production des différents types de véhicules.

⁹ Paramètre non pris en compte pour les deux roues



Voiture	
VU léger	
Vélo	
2 roues	
Bus/Car	
Poids lourds	
Train personnes	
Avion intérieur - personnes	
Avion international - personnes	
Transport fluvial - personnes	
Train - marchandises	
Transport fluvial - marchandises	
Avion - marchandises	

} Incertitudes majeures sur les volumes de production

Figure 39 : Classification des incertitudes relatives aux volumes de production du secteur du transport (du rouge plus incertain, au vert moins incertain)

Pour certains véhicules, ces valeurs ont pu être recroisés avec d'autres publications (voitures¹⁰ et camions¹¹). Pour les autres modes de transports, l'incertitude est plus élevée.

5.6.2.2. Masse unitaire des véhicules

Le poids associé à ces véhicules a été estimé grâce à la base de données Ecovinent v2.2. puis ajustée pour consolider un bilan cohérent national en reprenant les données nationales statistiques par matériaux (voir Figure 5).

Tableau 30 : masses des matériaux considérés par véhicule pour 2014 (en kg)

	Acier	Aluminium	Verre plat	Plastiques	Caoutchoucs
Voiture	1 111	130	30	197	44
VU léger	990	52	30	221	44
Vélo	6	8	-	2	1
2 roues	222	26	6	39	9
Bus/Car	6 785	1670	490	644	405
Train personnes	9 033	26 667	1 585	12 834	-
Avion - marchandises	-	210 000	-	23 700	-
Avion intérieur - personnes	10 938	164 000	-	16 200	-
Avion international - personnes	36 276	544 000	-	58 500	-
Poids lourds	8 738	351	73	375	612
Train - marchandises	71 600	6 620	235	6 691	10
Transport fluvial - marchandises	17 142	9	-	141	28
Transport fluvial - personnes	1 429	1	-	12	2

5.6.3. Eléments de prospective

5.6.3.1. Evolution des parts modales distances parcourues

Les principaux paramètres déterminants sont l'évolution des km.voyageurs et t.km transportés soit les parts modales et les distances parcourues avec les différents types de véhicules. Des hypothèses de cette nature ont été formulée dans la Vision ADEME 2030 – 2050 (ADEME, 2017) et dans le scénario négaWatt 2017.

¹⁰ "1,94 million de voitures qui devraient sortir des chaînes en 2014 " <https://www.usinenouvelle.com/editorial/la-production-automobile-en-hausse-de-8-4-en-2014-en-france.N300312>

¹¹ <http://www.transportinfo.fr/trois-construc-teurs-se-demarquent-en-2016/>

Tableau 31 : Evolution des t.km et km.voyageurs pour le secteur des transports¹²

	2014	2035	2050	Unité	Source
Vélo	5,96E+09	2,43E+10	3,20E+10	km.voyageurs	négaWatt
2 roues	1,39E+10	4,42E+10	5,46E+10	km.voyageurs	négaWatt
Bus/Car	6,92E+10	5,20E+10	5,10E+10	km.voyageurs	ADEME
Train personnes	1,03E+11	1,50E+11	1,87E+11	km.voyageurs	ADEME
Voiture	7,07E+11	6,62E+11	5,54E+11	km.voyageurs	ADEME
Avion intérieur - personnes	1,66E+10	5,89E+09	3,18E+07	km.voyageurs	négaWatt
Avion international - personnes	1,63E+11	1,30E+11	9,25E+10	km.voyageurs	négaWatt
VU léger	2,30E+10	2,50E+10	2,59E+10	t.km	ADEME
Poids lourds	3,72E+11	3,66E+11	3,47E+11	t.km	ADEME
Train - marchandises	3,26E+10	7,80E+10	1,27E+11	t.km	ADEME
Transport fluvial - marchandises	7,75E+09	1,50E+10	2,50E+10	t.km	ADEME

La figure ci-dessous illustre l'évolution des modes de transport de personnes : une diminution des déplacements en voiture facilité par le développement des modes doux, du covoiturage et des transports en communs.

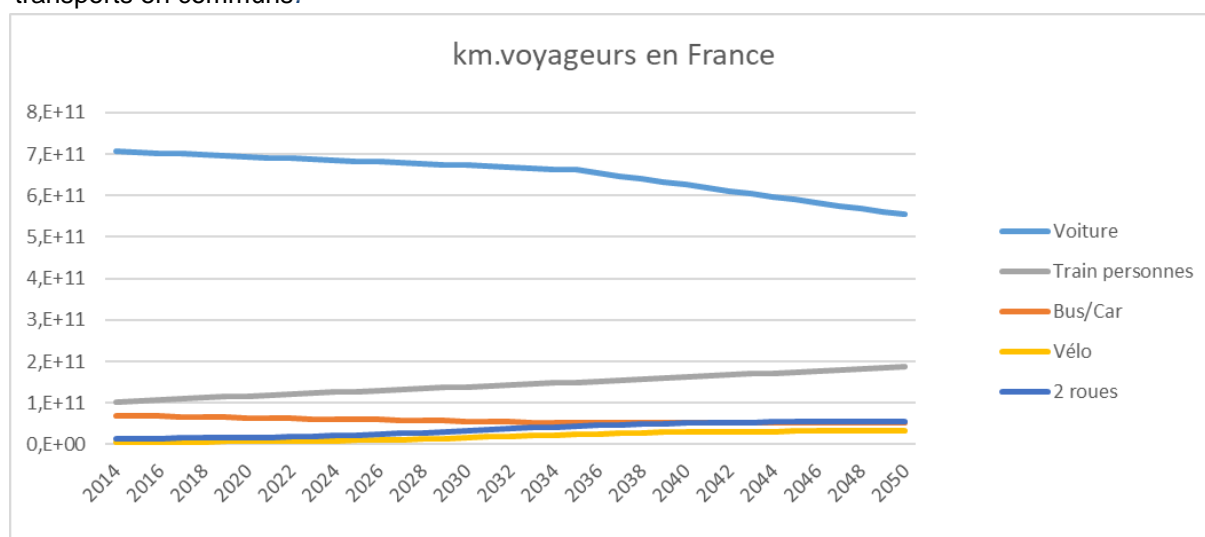


Figure 40 : Evolution des km.voyageurs en France entre 2014 et 2050

¹² E+09 correspond à x 10⁹



La figure ci-dessous illustre l'évolution des modes de transport de marchandises : une légère diminution des déplacements en voiture, et un fort développement du transport par train. A noter qu'entre 2000 et 2010 le transport de marchandise par train a été divisé par deux. Il y a donc en effet des marges de développement sur ce mode de transport dont les émissions de gaz à effet de serre par t.km sont significativement plus faibles que le transport routier.

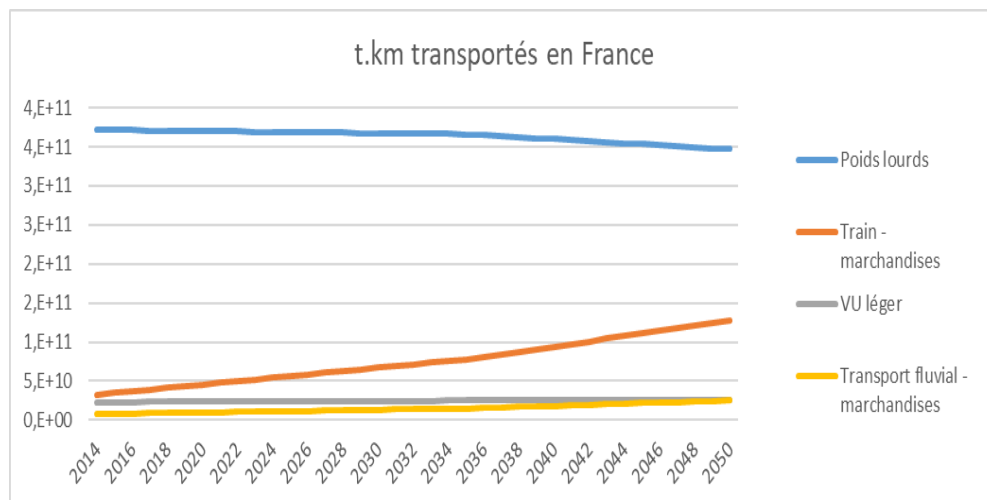


Figure 41 : Evolution des t.km en France entre 2014 et 2050

5.6.3.2. Taux de remplissage des véhicules

A date, les travaux de prospective de l'ADEME n'intègrent pas d'hypothèse sur le taux de remplissage des véhicules. Avec le développement du co-voiturage, on constate une augmentation du nombre de passagers par voiture. Le scénario négaWatt avance le passage de 1,58 personnes par véhicules en 2014 à 2 en 2030 et 2,4 en 2050.

Ce paramètre n'est pas pris en compte pour les autres véhicules.

5.6.3.3. Durée de vie des véhicules

L'allongement de la durée de vie des véhicules réduit le besoin en matériaux pour un même niveau de déplacement. Ce paramètre est donc intégré dans le modèle. Comme pour les autres biens d'équipements, il existe une marge de progrès sur l'amélioration de la réparabilité des véhicules. Cependant l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules envisagée dans les scénarios de transition énergétique tel que la Vision ADEME 2035-2050 (ADEME, 2017) implique un renouvellement du parc.

5.6.3.4. Poids unitaire des véhicules et composition matière

Mieux adapter la taille des véhicules aux besoins de déplacement est un axe clé de réduction des consommations de matériaux pour le secteur des transports.



Figure 42 : illustration du paramètre poids unitaire du véhicule

Pour une même capacité de transport des véhicules, il existe également des marges d'amélioration.

Une étude en cours de l'AIE compile de nombreuses publications sur le sujet avec notamment :

- Modaresi et al. (2014), Global carbon benefits of material substitution in passenger cars until 2050 and the impact on the steel and aluminum industries
- NHSTA (2012), Mass Reduction for Light-Duty Vehicles for Model Years 2017-2025

Ce paramètre d'allègement est pris en compte pour les voitures et les poids lourds. Un allègement de 25% est envisagé à 2035 et de 43 % à l'horizon 2050 pour les voitures ; et respectivement de 8 % et 13 % pour les poids lourds.

Ces allègements sont notamment liés à une modification de la composition matière des véhicules (voiture et poids lourds). Celle-ci est principalement liée à une réduction du pourcentage d'acier au profit de l'aluminium. Ainsi à 2050 la part d'acier diminue de :

- 54 % pour les voitures
- 41 % pour les véhicules

La part de l'aluminium augmente elle de

- 35 % pour les voitures
- 30 % pour les poids lourds



6. Données sur les matériaux

6.1. L'acier

6.1.1. Description du/des procédés

La production de l'acier se fait selon trois filières (FFA, 2017) :

- 1) La **filière fonte** ou oxygène ou encore les hauts fourneaux qui réduisent le minerai de fer par du monoxyde de carbone (CO) pour produire de la fonte. Celle-ci est ensuite mélangée avec environ 20% de ferrailles puis envoyée dans un convertisseur pour fabriquer de l'acier. Ce dernier peut être conditionné en lingots transportables ou produit en « coulée continue » (90 % de la production). L'acier en fusion est laminé sous forme de produits sidérurgiques plats ou longs (tôles, barres ou billettes).
- 2) La **filière électrique** est exclusivement alimentée par des ferrailles fondues qui sont également coulées en lingots mais le plus souvent produits en coulée continue.
- 3) La **fonderie** regroupe un panel de PME où les ferrailles sont directement fondues le plus souvent pour réaliser des pièces moulées et des alliages.

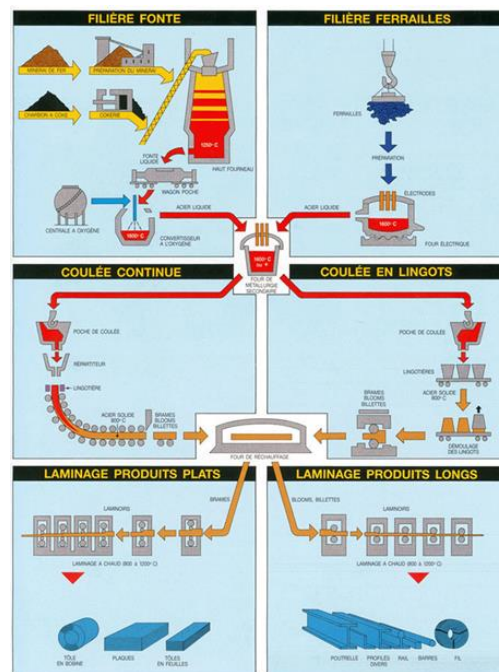


Figure 43 Diagramme de production et de transformation de l'acier

La Figure 43 résume ces procédés. Les produits issus de la fabrication, ou encore produits sidérurgiques, sont divisés en :

- Produits longs : rails, profilés, aciers à béton, fil machine et billettes
- Produits plats : plaques et tôles minces

Une partie de ces produits sont utilisés directement sans transformation : par exemple les rails, certains profilés, les ronds à béton. Une autre partie est soumise à la transformation et au travail de l'acier qui comprend :

- La fabrication des tubes
- Le tréfilage et l'étirage
- Le profilage et laminage à froid des feuillards
- Le forgeage
- L'emboutissage, l'estampage, la frappe à froid

La figure suivante représente le diagramme de production et de transformation de l'acier.

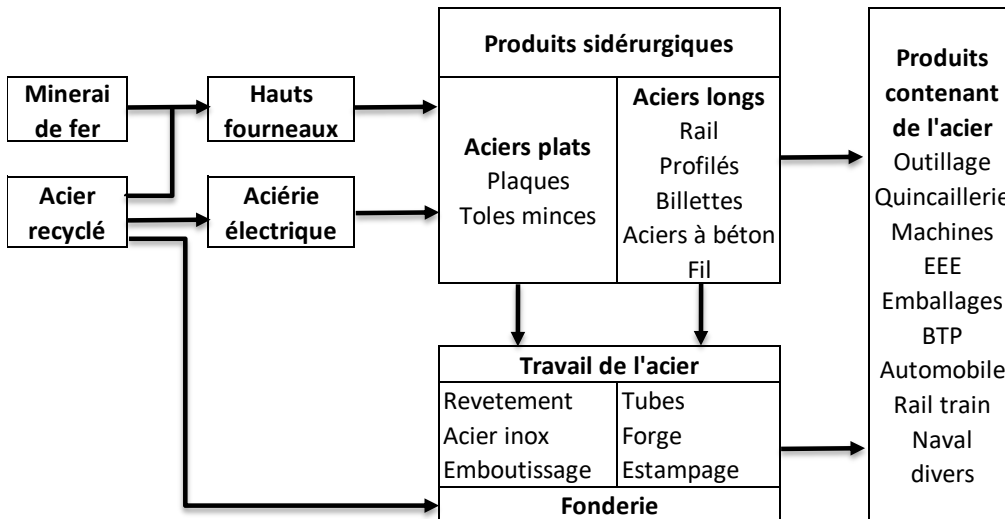


Figure 44: Diagramme de production et de transformation de l'acier

6.1.2. Situation actuelle

6.1.2.1. Production / import / export / consommation

Les flux de l'acier sont représentés pour l'année 2014 par le diagramme de la figure suivante.

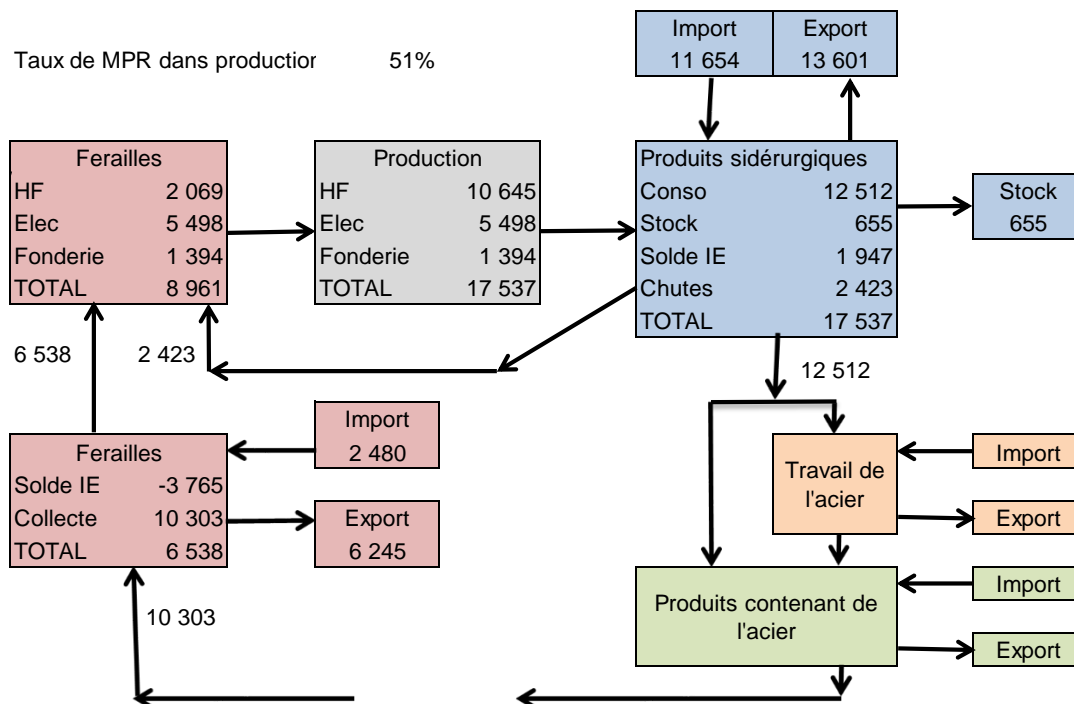


Figure 45 : Les flux de production de l'acier en 2014 (en kt)

Ce diagramme appelle les commentaires suivants :

- Dans le cycle de vie de l'acier, il y a 4 phases :
 - o La production de produits sidérurgiques longs et plats, réalisés en coulée continue
 - o Le travail de l'acier et/ou sa transformation
 - o L'assemblage de produits finis comprenant de l'acier (automobiles, électroménager,



- etc.)
- o La collecte des matières premières recyclables puis leur réintroduction dans le processus de production
- A chaque étape, il faut considérer les imports et exports. On constate que la France exporte davantage de produits sidérurgiques qu'elle n'en importe. La situation peut être différente pour le solde des produits finis contenant de l'acier car celui-ci dépend des importations de ces produits. Ce solde est fonction de la balance relative à tous les biens de consommation.
 - Il faut distinguer la production brute d'acier de la production apparente. En effet, sur les 17 537 kt produites, 2 423 kt sont immédiatement recyclées car ce sont des chutes de production. La production apparente est de $17\,537 - 2\,423 = 15\,114$ kt.
 - Le taux de MPR dans la production vaut $8\,961 / 17\,537 = 51\%$. Ce taux tient compte de la récupération de chutes lors de la fabrication ou du travail de l'acier. Si on ne tient pas compte de ces chutes, le taux devient $(8\,961 - 2\,434) / (17\,537 - 2\,434) = 43\%$.

6.1.2.2. Les usages de l'acier

Les catégories de produits sidérurgiques sont très différentes en Europe d'un pays à l'autre. Par exemple le matériel de voirie est essentiellement produit en Autriche, en République Tchèque et en France alors que les ronds à béton sont plutôt la spécialité de l'Allemagne, l'Italie, l'Espagne et la Pologne (*BIRAT, Principaux produits sidérurgiques - Aciers, applications et modes de production / Réf. : M7020 V4 , 2017*). Ceci explique la vigueur du commerce international.

La répartition des usages à la consommation en Europe et dans le Monde est présentée dans le tableau suivant.

Tableau 32 : Utilisation des produits y compris des aciers spéciaux. Consommation finale d'acier dans l'UE-28 entre 2010 et 2014 et dans le monde en 2011 (BIRAT, Principaux produits sidérurgiques - Aciers, applications et modes de production / Réf. : M7020 V4 , 2017)

Catégorie d'utilisation	Branches industrielles	Europe (en %)	Monde (en %)
Construction	Bâtiments, travaux publics, matériel de voie, construction métallique	33	51
Automobile	-	19	12
Construction mécanique <i>Mechanical Engineering</i>	Aérothermique, matériels des travaux publics et de la sidérurgie, matériel agricole	15	14,5
Travail des métaux <i>Metalware</i>	Forge, boulonnerie, découpage, gros emboutissage ressorts, quincaillerie, mobilier, fûts, boîtes, chaudronnerie	14	12,5
Tubes	-	11	-
Électroménager <i>Domestic appliances</i>	-	3	2
Autres transports	Naval, ferroviaire, cycles	3	4,8
Divers	-	2	3
Total	Moyenne entre 2010 et 2014 : - européenne 154,95 Mt - mondiale 1 518 Mt en 2011	100	100

Si la répartition européenne des usages de l'acier à la consommation est connue, il n'en est pas de même pour la répartition nationale. De l'avis de nombreux professionnels, cette répartition est difficile à établir pour deux raisons principales :

- la ramification des imports et exports
- le secret statistique qui entoure ces données : les unités sidérurgiques sont peu nombreuses et les producteurs ne souhaitent pas que leurs concurrents aient connaissance de la vitalité ou non de leur activité.

Parmi les catégories mentionnées dans ces statistiques, deux rubriques (tubes et travail des métaux *Metalware*) sont destinées à être ventilées dans des biens de consommations finaux. Il a fallu émettre des hypothèses quant à la répartition de cette destination. Ces valeurs ont été ajustées au regard de celles obtenues en additionnant les totaux obtenus pour chaque secteur, issus d'une approche « ascendante » (basée entre autres sur des ACV et décrits dans les chapitres correspondants (cf. construction, transport, emballages, etc.).

Les résultats du comparatif sont exposés dans le tableau suivant :

Tableau 33 : valeurs comparées et retenues pour les usages de l'acier en France

Secteur	Eurosteel	Eurofer France 2015		Retenu 2014	
	Europe 2014	Global	Sectoriel (direct & travail de l'acier)		
Usages directs		82,1%	100%		100%
Construction	33%	41,4%	50,4%	Bâtiment	43,3%
				Ouvrages d'art	3,8%
				Réseau ferré	0,6%
				Voirie	3,4%
				Eolien	0,4%
Industrie mécanique	15%	12,3%	15,0%		15,0%
Automobile	19%	25,2%	30,7%		27,9%
Autres transports	3%	0,2%	0,2%		1,8%
Electroménager	3%	3,0%	3,1%		3,7%
Divers	2%	0,0%	0,0%		0,0%
Travail de l'acier		17,9%	100%		100%
Tubes	11%	4,8%	26,8%	Bâtiment	3,6%
				Ouvrages d'art	15,6%
				Voirie	7,7%
Metalware	14%	13,1%	73,2%	Mécanique	52,0%
				Emballages	21,1%

6.1.3. Eléments de prospective pour l'acier

6.1.3.1. Évolution de la production

La demande dépend des biens de consommation et essentiellement des secteurs du bâtiment, du transport, et de l'énergie. La production de l'acier en France a toujours été supérieure à la consommation mais aujourd'hui cette industrie est importatrice de produits sidérurgiques. La baisse de consommation accompagnée par une conservation des outils de production actuels et le développement de l'aciérie électrique pourrait permettre d'enrayer le déclin actuel.

6.1.3.2. Évolution de la part du recyclage

Pour l'évolution des taux de recyclage, il faut distinguer :

- Le pourcentage d'introduction de ferrailles dans les hauts fourneaux. Actuellement de 20%, ce taux pourrait grimper jusqu'à 30% (source A3M)
- La proportion d'acier issu de la filière électrique et de la fonderie

La répartition entre ces deux procédés est le résultat de plusieurs causes :

- D'un point de vue économique, il est plus intéressant aujourd'hui d'exporter la collecte de MPR que de les fondre dans les aciéries électriques et les capacités de production sont sous utilisées. Cette contrainte pourrait être radicalement différente en 2050.
- L'introduction de MPR doit être en conformité avec le potentiel de ferrailles collectées. Ce potentiel peut être calculé sur la base de l'évaluation de l'acier contenu dans les biens consommés directement ou indirectement (produits finis importés). Il y a cependant une différence entre l'acier contenu dans les produits achetés l'année n et celui contenu dans les objets mis aujourd'hui au rebus mais achetés à l'année n-x. Il faut donc émettre une hypothèse sur la durée de vie des produits.
- Les qualités d'acier primaire ou issues de MPR ne sont pas identiques. Traditionnellement les aciéries électriques sont destinées à la fabrication de produits longs et les hauts fourneaux à la fabrication de produits plats. Ce n'est pas une question de procédé car les hauts fourneaux comme les aciéries électriques permettent l'un ou l'autre des produits sidérurgiques. L'explication vient des exigences en termes de résistances mécaniques : pour les produits plats destinés à l'automobile et aux emballages, l'acier est embouti et doit avoir de bonnes résistances mécaniques pour supporter les déformations. De plus il doit résister aux crash test. L'acier primaire dispose de ces qualités mais pas l'acier recyclé. Cependant, ce problème ne



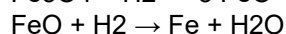
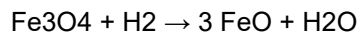
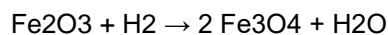
se pose pas de la même façon pour les bardages et les tôles utilisées en électroménager. En 2014, la proportion d'acier destiné à l'automobile et aux emballages est de 27%. Comme l'acier est produit à 46% dans des hauts fourneaux, il reste une marge de substitution par de l'aciérie issue de MPR. En 2050, la part de l'acier destiné aux emballages et à l'automobile pourrait atteindre 22%. En théorie, ce devrait être la part réservée aux hauts fourneaux, les 78% restant étant produits par fusion de ferrailles. Dans une telle perspective, et si on considère que 30% de ferrailles sont introduites dans les hauts fourneaux, le taux d'incorporation de MPR serait de $78\% \cdot 100\% + 22\% \cdot 30\% = 85\%$. Compte tenu des pertes et des aléas de la collecte, une hypothèse cohérente serait un taux d'incorporation de MPR de 80% pour 2050.

6.1.3.3. Évolution du procédé

Le paragraphe suivant fait état de potentielles évolutions de procédés pour décarboner le secteur. Ces évolutions sont présentées à titre illustratifs et ne sont pas nécessairement utilisées dans le modèle qui a été développé. Ils feront l'objet, au-delà de cette étude, d'une analyse plus approfondie dans le cadre de développement de Plans de Transition Sectoriels que mènera l'ADEME en concertation avec les acteurs.

La réduction directe (sans utilisation de charbon) mais à l'hydrogène représente 4% de la production dans le monde. L'hydrogène est fourni par du gaz fossile. Cette technique n'est pas mise en œuvre en France.

Les réactions de réductions sont alors :



A ce stade non développée pour des raisons économiques, cette technique pourrait être très intéressante à l'échelle mondiale en 2050 avec de l'hydrogène issu des électrolyseurs. Son développement en France reste incertain.

Cette technique permettrait de réduire à zéro les émissions directes de GES générées par le processus. (EU, 2018).

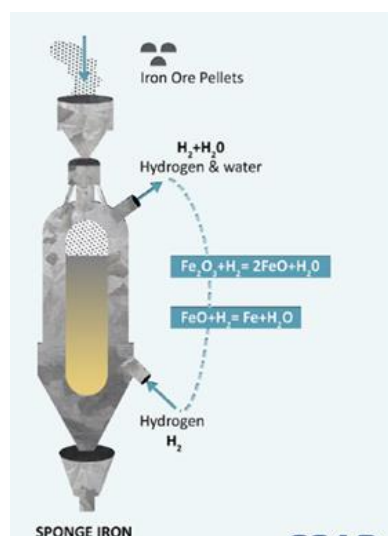


Figure 46 : réduction directe de l'acier par hydrogène



6.2. L'aluminium

6.2.1. Description des procédés

L'aluminium peut être produit de deux façons (Aluminium.fr, 2018) (SCF S. c., Aluminium, alumines, 2015) :

- L'aluminium primaire est fabriqué à partir de la bauxite. Celle-ci est concassée puis chauffée dans un four pour obtenir de l'alumine. Cette dernière est réduite par électrolyse pour donner de l'aluminium liquide.
- L'aluminium secondaire ou recyclé est produit par une fusion de déchets d'aluminium. Ce procédé est 20 fois moins consommateur d'énergie par kg d'aluminium produit.

L'aluminium liquide est alors coulé sous forme de lingots. Contrairement à l'acier où les produits sidérurgiques subissent dans leur grande majorité un traitement en coulée continue, les lingots d'aluminium sont transportés vers d'autres usines de création de produits finis savoir :

- des plaques de 30 t destinées au laminage pour faire des tôles
- des billettes destinées à la fabrication de profilés ou de câbles

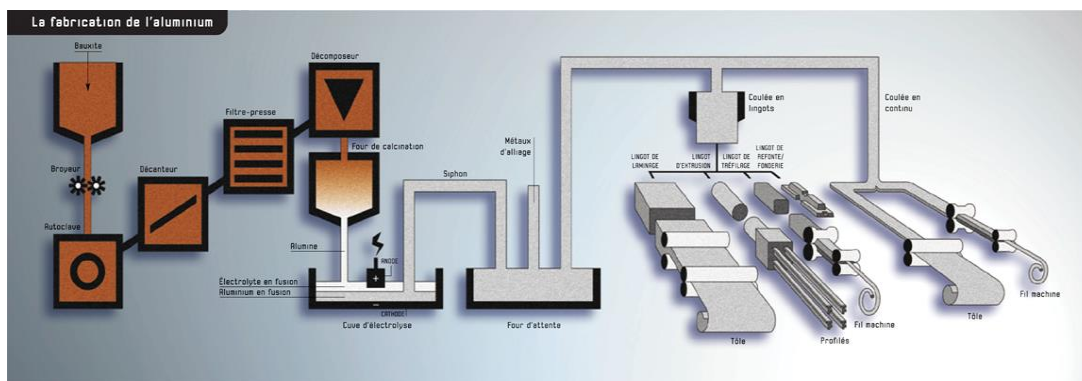


Figure 47 : Comment est fabriqué l'aluminium ? (RIO TINTO, 2019)

L'aluminium peut être indéfiniment recyclé et les propriétés du métal primaire sont identiques à celles du métal secondaire.

La vraie question est celle des alliages. L'adjonction d'autres métaux accroît la résistance et/ou l'élasticité et elle conditionne les usages. Il existe ainsi différentes catégories d'aluminium selon la nature et le pourcentage des métaux coexistant. Il existe alors trois techniques d'alliage selon la provenance du métal :

- A partir d'aluminium primaire pur : on maîtrise parfaitement les quantités des intrants
- A partir de déchets dont la provenance et donc l'alliage est identique, par exemple des canettes recyclées servent à la production de cannettes, ou bien des chutes de production. On parle alors de **recyclage direct**.
- A partir de déchets divers où avec le bain liquide d'aluminium recyclé, on sépare les différents métaux alliés, et on fabrique de nouveau alliages. Cela nécessite souvent l'adjonction d'aluminium primaire pur. On parle alors d'**affinage**.

6.2.2. Situation actuelle

6.2.2.1. Production / import / export / consommation

Les flux 2014 relatifs à l'aluminium, sont donnés dans le document ADEME, bilan du recyclage (ADEME, Bilan national du recyclage 2005-2014, 2017) et les chiffres clés AFA (Aluminium.fr, 2018). On a alors la comparaison suivante :

Tableau 34 : Production et commerce des lingots d'aluminium primaire et secondaire

kt		Production	Importation	Exportation	Consommation
Alu brut	ADEME	380	422	149	653
	AFA	381			
Alu recyclé	ADEME	463	110	67	506
	AFA	454			
TOTAL	ADEME	843	532	216	1 159
	AFA	835			

Pour ce qui est des produits, les données de production EUROSTAT (EUROSTAT, 2014) sont incomplètes. En revanche, on dispose des exports/imports.

Enfin, l'AFA (MOUNIER, 2018) mentionne une consommation de produits finis de 1367 kt.

Le schéma des flux de l'aluminium est alors le suivant :

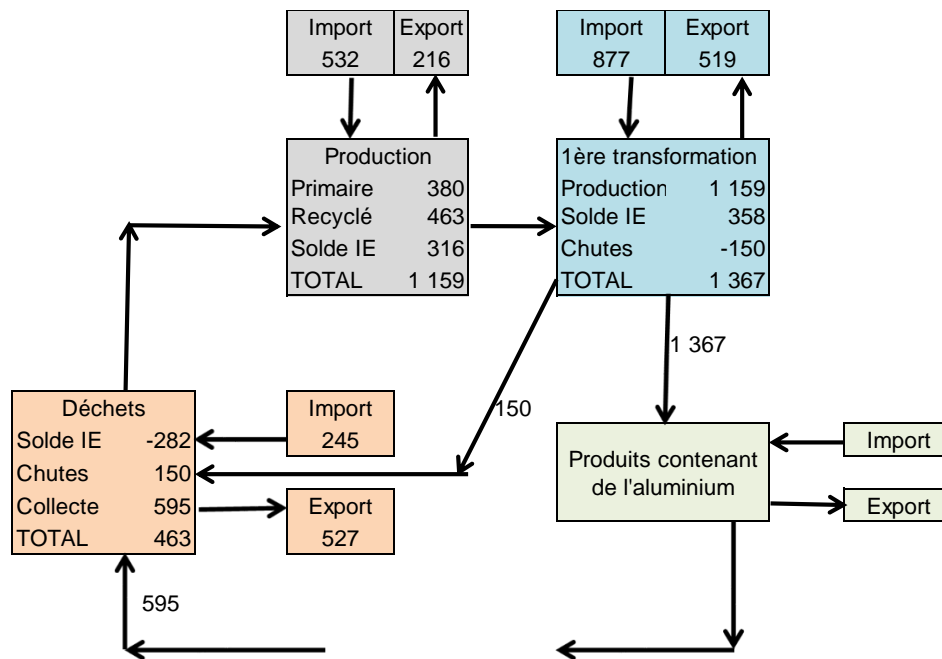


Figure 48 : Diagramme des flux pour l'aluminium en 2014

A la production, le taux d'incorporation de MPR est de $380 / (463+380) = 54\%$. Pour la première transformation, un certain nombre de lingots sont importés et exportés et leur provenance peut être étiquetée. Cela modifie la proportion de matériau secondaire, et en fonderie celle-ci est de 44%

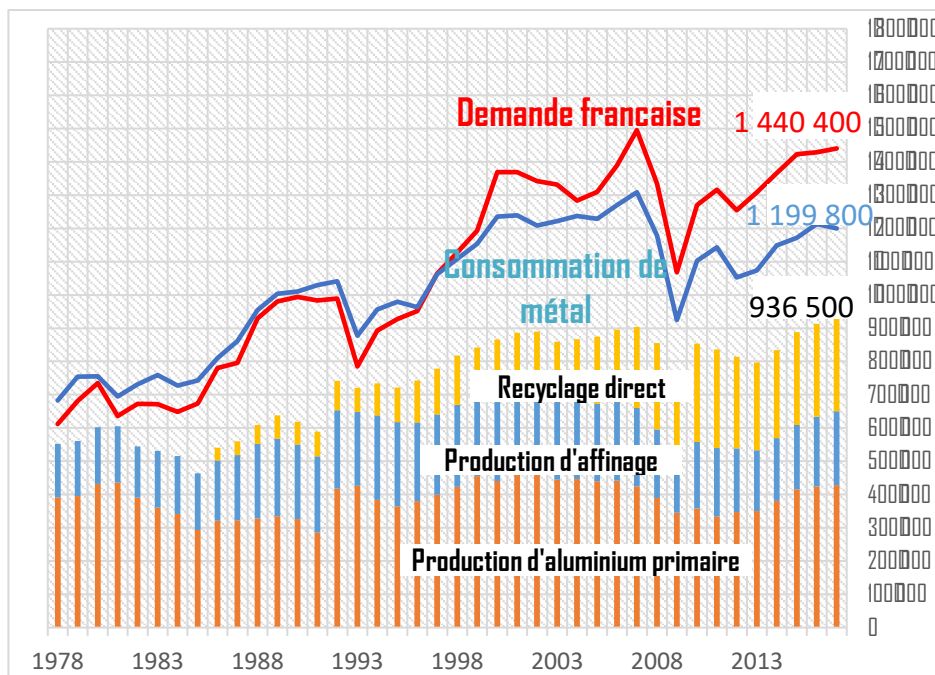


Figure 49: Evolution de la production d'aluminium primaire, secondaire et de la demande en matériau et en produits finis (MOUNIER, 2018)

On constate une augmentation certaine de la production et consommation d'aluminium. Que ce soit pour le matériau brut ou les produits semi finis, l'activité est importatrice. Enfin, il y a 40 ans, seul 27% de MPR entraient dans la fabrication contre 46% en l'an 2000 et 54% aujourd'hui.

6.2.2.2. Demande et usages

Les usages de l'aluminium en 2014 sont fournis par l'AFA (Aluminium.fr, 2018) pour l'Europe et la société chimique de France (SCF S. c., Aluminium, alumines, 2015) pour le monde. Nous avons supposé que les usages étaient quasi identiques en France et avons adapté par un recoupement qui tient compte des évaluations dans chacun des secteurs :

Tableau 35 : Usage comparatifs de l'aluminium dans le Monde, en Europe et supposé en France

SECTEUR en 2014	Monde	EU	Retenu
Mécanique	22%	14%	17%
Electricité / électronique			8%
Divers autres	18%	7%	6%
Emballages (valeur connue)	8%	16%	12%
Transports terrestres	27%	3%	22%
Transports (Naval aérien)			10%
Ouvrages d'art			6%
Voirie			7%

6.2.3. Eléments de prospective

6.2.3.1. Évolution de la production

La production d'aluminium est conditionnée par trois secteurs en pleine évolution : le bâtiment, le transport et les emballages. Le reste de la demande concerne des articles de consommation courante et ne devrait pas subir de modifications majeures.

L'industrie française est aujourd'hui importatrice d'aluminium que ce soit des lingots ou des produits finis, alors qu'elle exporte des MPR. A cela il faut ajouter l'aluminium importé dans nos biens de consommation courants. Il y a donc une marge de production d'aluminium en France aujourd'hui pour satisfaire la demande.

6.2.3.2. Évolution de la part du recyclage

La part de l'aluminium recyclé incorporé à la fabrication a beaucoup augmenté ces dernières années pour passer de 38% il y a dix ans à 54 % aujourd'hui.

Ce taux d'incorporation pourrait à l'avenir être augmenté pour les raisons suivantes :

- Tous les MPR collectés et recyclés ne sont pas mobilisés puisqu'il y a en France en 2014, un solde exportateur de 280 kt
- Le taux de collecte et de recyclage pourrait être amélioré. La consommation de produits semi finis en aluminium est de 1367 kt. Le solde importateur de l'aluminium contenu dans les produits finis est estimé à environ 200 kt. Or aujourd'hui les MPR collectés sont de 595 kt ce qui mène à un taux de collecte et recyclage global de $595 / 1567 = 40\%$

A l'horizon 2050, la consommation d'aluminium ne devrait pas diminuer et il est possible de se baser sur un gisement de déchets de 1 500 kt. L'efficacité de récupération (taux de collecte et de recyclage global) dépend des filières. Aujourd'hui, en Europe, ce taux est de 90% pour la construction et l'automobile et 70% pour les canettes. Ce taux atteint 98 % en Finlande où un système de consigne a été mis en place.

Il est possible de supposer que de 40%, ce taux atteigne des valeurs exposées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 36 : efficacité de récupération optimale et globale calculée à partir des différentes filières

SECTEUR en 2050	Monde	Efficacité récup
Mécanique, électricité, divers	31%	50%
Emballages (valeur connue)	12%	90%
Transports	32%	90%
Bâtiment	25%	90%
TOTAL	100%	78%

En 2050, il serait possible de disposer de 1 150 kt de MPR, ce qui correspond à la production de matériau brut et à 85% de celle des produits finis.

Il serait alors possible en première approximation, d'anticiper un taux d'incorporation de 85% en 2050.



6.3. Le clinker

6.3.1. Description du/des procédés

Le clinker est obtenu par la cuisson d'un mélange composé d'environ 80 % de calcaire et de 20 % d'aluminosilicates (notamment des argiles qui apportent le silicium, l'aluminium et le fer) réduits en poudre.

Cette cuisson, la **clinkérisation**, se fait à une température d'environ 1 450 °C, ce qui explique la forte consommation énergétique de ce processus (Wikipedia, 2019).

Le Clinker est utilisé pour la fabrication du ciment, dont il est le composant principal, mais pas le seul. On y adjoint différents adjuvants, comme le gypse, les laitiers de haut fourneau, des cendres volantes, du calcaire, des liants géotechniques, etc. La teneur en clinker des différents types de ciment est définie par la norme NF EN 197-1. La description suivante peut être lue sur le site Infociments (Organisations professionnelles de l'industrie cimentière, 2018) :

- « **Le CEM I ou ciment Portland**, contient au moins 95 % de clinker (K) et au plus 5% de constituants secondaires. Les CEM I conviennent pour le béton armé ou le béton précontraint, là où une résistance élevée est recherchée ainsi qu'un décoffrage rapide.
- **Le CEM II/A ou B ou ciment Portland composé**, contient au moins 65% de clinker (K) et au plus 35 % d'autres constituants secondaires : laitier de haut-fourneau (S), fumée de silice (D)(entre 6 et 10 %, pouzzolane naturelle (P), cendres volantes siliceuses (V), schiste calciné (T) et calcaire (L ou LL). Les CEM II sont adaptés pour le béton armé en général, coulé sur place ou préfabriqué, ainsi que pour des travaux massifs exigeant une élévation de température modérée ou encore pour des travaux exigeant des résistances initiales élevées (classe R).
- **Le CEM III/A ou B ou ciment de haut-fourneau**, contient entre 36 et 80 % de laitier de haut-fourneau (S) et 20 à 64 % de clinker (K). Le CEM III/ C (également dit ciment de haut-fourneau) contient au moins 81 % de laitier de haut fourneau (S) et 5 à 19 % de clinker (K).
- **Le CEM IV/A ou B est un ciment pouzzolanique**. Ce type de ciment n'est pas fabriqué en France.
- **Le CEM V/A ou B ou ciment pouzzolanique au laitier** contient de 20 à 64 % de clinker (K), de 18 à 49 % de laitier de haut fourneau (S) et de 18 à 49 % de cendres volantes siliceuses (V).
- **Le CEM VI ou ciment composé** contient de 35 à 49 % de clinker (K), de 31 à 59 % de laitier de haut-fourneau (S) et de 6 à 20 % de calcaire (L ou LL).

Les CEM III, CEM V et CEM VI qui comportent du laitier de haut-fourneau sont bien adaptés aux travaux hydrauliques souterrains, aux fondations, aux travaux en milieu agressif, aux travaux à la mer, aux bétons de masse et généralement à tout travaux nécessitant une faible chaleur d'hydratation. Leur utilisation permet de réduire les émissions de CO₂ grâce à la substitution du clinker par d'autres constituants. »

Le ciment est lui-même un des constituants du béton, qui est le produit sur lequel s'exprime la demande.

6.3.2. Situation actuelle

6.3.2.1. Production/import/export/consommation

En 2014 la production de clinker en France est de 13 146 kt.

347 kt sont importées, et 183 kt sont exportées, soit un solde importateur de 1,2%.

La consommation de clinker s'élève à 13 310 kt.

Source : Infociments sur l'année 2014 (CIM Béton, ATILH et Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, 2015).

6.3.2.2. Demande

L'usage final du clinker est sous forme de béton (exprimée en tonnes de matière sèche). La modélisation des consommations et de clinker implique donc de quantifier les autres composants du ciment pour arriver aux statistiques de volume sur le béton : granulats et sables.

Demande de ciment

Les adjuvants contribuant à la fabrication du ciment sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 37 : adjuvants entrant dans la composition du ciment (données Infociments sur l'année 2014 (CIM Béton, ATILH et Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, 2015))

Adjuvants	Consommation pour la fabrication du ciment en 2014
Liants géotechniques	816 kt
Gypse	643 kt
Laitier de ht fourneau	1 501 kt
Cendres volantes	260 kt
Calcaire	983 kt
Autres	304 kt

Si on fait le total de ces consommations de clinker et d'adjuvants, on obtient 17 817 kt de ciment, ce qui n'est pas cohérent (8% d'écart) avec le total de production de ciment de la même source, soit 16 426 kt de ciment produit en 2014.

Cet écart n'a pas pu être expliqué. Il est sans doute dû à un périmètre légèrement différent entre les deux tableaux de ce même document (CIM Béton, ATILH et Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, 2015).

On observe ici un **taux d'ajout** compris entre 1,23 et 1,34 selon la donnée utilisée. La valeur de 2016 communiquée par l'ATILH est de 1,27 (ATILH, 2018). **La cartographie de 2014 retient un taux d'ajout de 1,23**, qui permet de cohérent avec les statistiques d'Infociments 2015 (CIM Béton, ATILH et Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, 2015).

Les importations de ciment sont de 2 935 kt, et les exportations de 1 868 kt, soit un solde importateur net de 11,4 %.

La consommation de ciment est de 18 165 kt en 2014 (Infociments 2015 (CIM Béton, ATILH et Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, 2015), 1% d'écart avec les chiffres précédents). Ce chiffre semble le plus fiable et sera utilisé comme référence pour la suite.

Demande de béton

En ce qui concerne le béton, il faut ajouter les volumes de granulats et sable. Les statistiques de l'UNPG pour 2014 (UNPG, 2015) flèchent 112 000 kt de granulat pour l'usage du béton (toute filière, soit de chantier, industriel, prêt à l'emploi et produits en béton). L'affectation filière par filière des tonnages de ciment et de granulats et sables aboutit à une part de ciment dans le béton (sec) comprise entre 13,4 % et 15,8 %. Or les échanges avec les industriels (retour recueilli lors du séminaire organisé dans le cadre de cette étude en septembre 2018) ont montré que cette différenciation n'a pas lieu d'être. L'approche retenue a donc été de travailler uniquement sur les volumes toutes filières confondues, soit avec un **taux moyen de ciment dans le béton de 14%**.

Sur cette base on peut estimer le tonnage de **béton produit à 130 940 kt en 2014**.

Les toupies de béton prêt à l'emploi voyagent peu pour des raisons techniques (une cinquantaine de kilomètre maximum avant que la prise ne commence). C'est pourquoi les imports – exports sont très limités : on note tout de même 174 kt importés et 248 kt exportés, soit un solde exportateur de 74 kt (0,1% de la production totale de béton) (source : UNICEM, statistiques 2014 (UNICEM, 2015)).

Les éléments béton préfabriqués voyagent également assez peu car ils sont lourds, et par ailleurs les éléments les plus courants comme les agglos (parpaings) sont produits localement afin de resserrer les prix sur ce marché très concurrentiel. On note tout de même 1 600 kt importées et 400 kt exportées, soit un solde net importateur de 1 200 kt, soit 0,9% de la production totale de béton.



Usages du béton

Les statistiques d'usages de la filière du béton sont en fait exprimées de nouveau en ciment. La donnée la plus récente disponible provient d'Infociments, statistiques de 2007 (CIM Béton, ATILH et Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, 2008) :

Tableau 38 : utilisation du ciment par usage final du béton (Source : (CIM Béton, ATILH et Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, 2008)

Usages Ciment			Stat 2007
Bâtiment	Neuf	Logements	30,5%
		Tertiaire Enseignement et hospitalier	3,0%
	Autres (agricole, bureau, commerce)		11,0%
	Bâtiment Industriel		5,5%
	Entretien de bâtiments		12,5%
TP	Ouvrages d'art, maritime, fluviaux et équipements industriels		8,5%
	Voiries, routes et annexes		13,0%
	Eau, assainissement, réseaux		10,0%
	Divers		6,0%

On note que la part du bâtiment est de 62,5%, et celle des Travaux Publics (TP) est de 32,5%

La modélisation réalisée sur la demande du bâtiment aboutit à une consommation en 2014 de 82 270 kt de béton, contre 48 680 kt pour les TP et les équipements de production d'énergie, soit une répartition de 62,8 % pour le bâtiment, ce qui est bien cohérent avec les statistiques disponibles (compte tenu de l'imprécision du ratio unique de 14 % pour la part de ciment dans le béton). On note en violet sur ce graphique une part importante du béton pour les TP qui n'a pu être affectée précisément (c'est l'écart entre la modélisation en partant des usages –bottom-up– et les statistiques globales -top-down). Cet usage non connu du béton sera supposé constant dans la scénarisation des années postérieures.

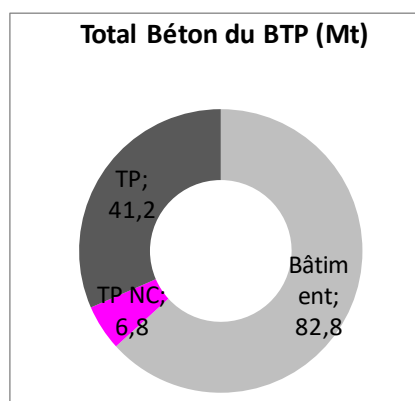


Figure 50 : Modélisation de l'année 2014 : répartition globale des usages du béton dans le BTP

Les usages du béton dans le bâtiment sont de 84% pour la construction neuve.

Par ailleurs, ceux-ci sont équilibrés entre Maison individuelle (31%), Logements collectifs (28%) et Tertiaire (33%), un solde de 8% étant affecté aux bâtiment Industriels et tertiaires.

Ces répartitions sont cohérentes avec la figure suivante à +/- 5 points près, ce qui est acceptable vu l'incertitude sur le taux de ciment dans le béton.

Les graphiques ci-dessous illustrent cette répartition :

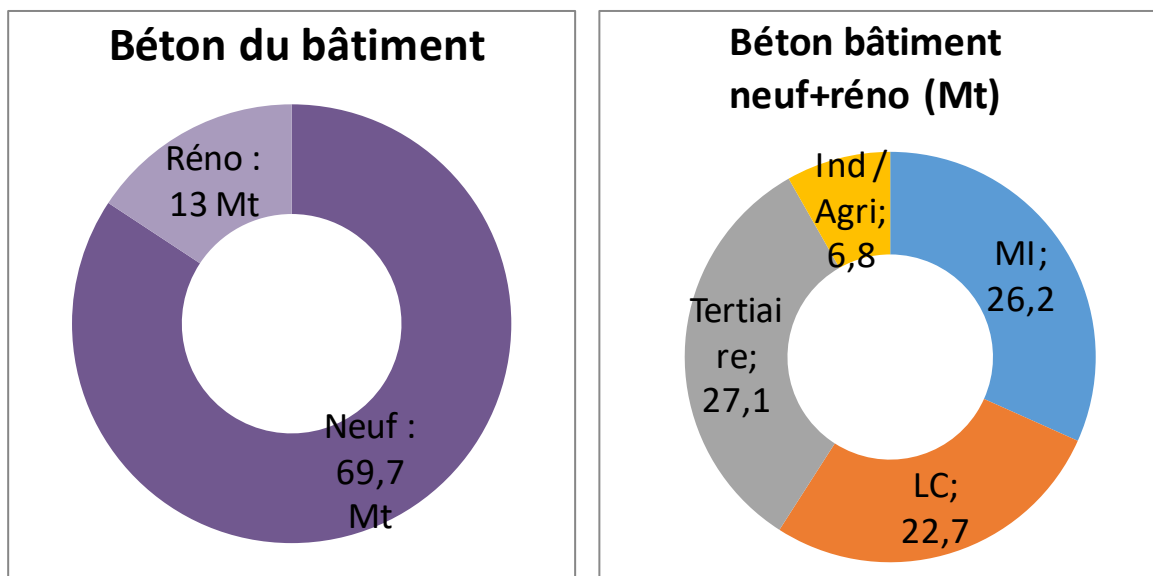


Figure 51 : Modélisation de l'année 2014 : répartition des usages du béton dans le Bâtiment

Pour les TP, on peut distinguer les usages pour les routes (16,4 Mt), les voies ferrées (0,4 Mt), les ouvrages d'art (11,0 Mt), les VRD (voiries et réseaux divers, 13,4 Mt) et un poste « divers » (6,8 Mt) correspondant aux 6% de ciment affectés en « Divers » (source : Infociments 2008 (CIM Béton, ATILH et Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, 2008) (cf. § ci-dessus), et qui apparaissent en violet dans la figure ci-après (dans la mesure où nous ne savons pas exactement à quoi il sert).

Le graphique ci-après illustre la répartition des usages du béton dans les TP.

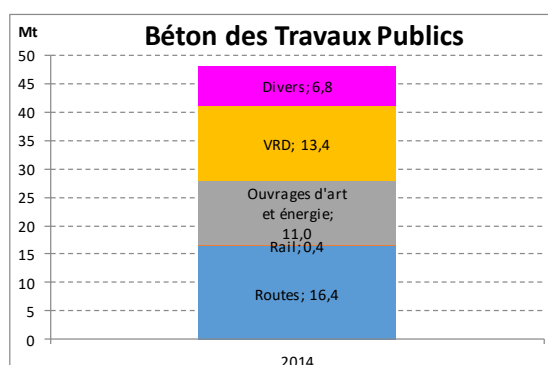


Figure 52 : Modélisation de l'année 2014 : répartition des usages du béton dans les TP

6.3.3. Éléments de prospective

6.3.3.1. Évolution de la demande

L'évolution de la demande de béton dans le bâtiment et les TP est décrite en détail dans leur partie respective, toutefois, le déterminant principal reste le secteur de la construction neuve. Les scénarii sur la rénovation n'ont qu'un impact marginal. La consommation de béton est principalement liée au rythme de construction neuve. De même le rythme de construction des routes et la substitution du béton vers d'autres procédés constructifs n'ont qu'un impact marginal sur la demande en ciment.

6.3.3.2. Evolution des Import / export

Le taux d'importation de clinker, direct sous forme de clinker et indirect sous forme de ciment, a été concaténé en un seul indicateur pour simplifier la lecture et la modélisation. On part donc d'un taux d'import net de 10,8% en 2014.



La tendance actuelle est plutôt à la délocalisation de la production de clinker vers des pays hors EU, notamment pour des raisons économiques, liées au mécanisme de quota carbone sur les industries européennes fortement émettrices de GES, dont les cimentiers font partie.

Plusieurs professionnels ont indiqué lors des entretiens et du séminaire organisé en septembre 2018 que cette tendance devrait s'inverser dès la mise en place soit d'une taxe « carbone » sur les importations de ciment et clinker aux frontières de l'Europe (MIC : Mécanisme d'inclusion carbone), soit d'une harmonisation internationale des mécanismes de quota carbone. L'une ou l'autre de ces mesures est considérée comme très probable à court terme par les professionnels. C'est pourquoi les professionnels pensent réaliste la réduction du taux d'importation de 10,8% en 2014 à 8% environ en 2050.

6.3.3.3. Évolution de la part du recyclage

Cette rubrique est sans objet.

Pour mémoire les communications actuelles des filières béton sur le « béton recyclé » sont en réalité limitées au recyclage des granulats de démolition en remplacement des granulats issus de l'extraction du sol. Pour autant ce procédé nécessite toujours la même quantité de ciment pour réaliser le béton, et donc la même quantité de clinker. L'impact énergétique et climatique du béton dit « recyclé » est donc identique à celui du béton neuf, impact des granulats mis à part ce qui constitue une fraction très minoritaire.

6.3.3.4. Évolution du procédé

Le paragraphe suivant fait état de potentielles évolutions de procédés pour décarboner le secteur. Ces évolutions sont présentées à titre illustratifs et ne sont pas nécessairement utilisées dans le modèle qui a été développé. Ils feront l'objet, au-delà de cette étude, d'une analyse plus approfondie dans le cadre de développement de Plans de Transition Sectoriels que mènera l'ADEME en concertation avec les acteurs.

La technique de cuisson du clinker ne fait pas l'objet d'une évolution prévisible.

Cependant, la filière fait l'objet d'une attention particulière dans la réduction des impacts environnementaux. Elle tient par exemple un rôle majeur dans le mécanisme européen de quota d'émission de gaz à effet de serre. L'impact climatique de la construction neuve est aussi un des enjeux majeurs de la future réglementation environnementale des bâtiments (RE 2020) qui sera applicable dès 2020.

C'est pourquoi les industriels travaillent sur le concept de béton « bas carbone », concept qui recouvre deux notions :

- La recherche sur des clinkers de composition différente, (clinker sulfo-alumineux). Cependant les professionnels lui prédisent un développement plutôt lent (5% de part de marché en 2050), et ce pour un gain en CO₂ de 30% environ. Compte tenu de ce potentiel de réduction très faible (30% sur 5% du marché = 1,5 % d'impact) vis-à-vis de la notion suivante, cette évolution n'a pas été modélisée. Cependant cette piste reste intéressante et à suivre si elle était amenée à prendre des parts de marché plus importantes.
- Le recours à des ciments à plus faible taux de clinker, en travaillant sur de plus forts taux d'adjuvants. Le potentiel de réduction de l'impact serait de passer d'un taux d'ajout de 1,23 en 2014 à 1,5 en 2050, soit une réduction de la consommation de clinker de 16%.

L'historique de ce taux d'ajout n'est pas disponible dans la bibliographie. Cependant, on peut l'illustrer à travers l'évolution du marché des ciments, où l'on a déjà pu constater une réduction de l'usage de ciments de type CEM I au profit de ciments CEM II et CEM III notamment, qui ont une plus faible teneur en clinker, soit un taux d'ajout supérieur. Cette évolution est déjà en cours, comme en témoigne le graphique ci-après :

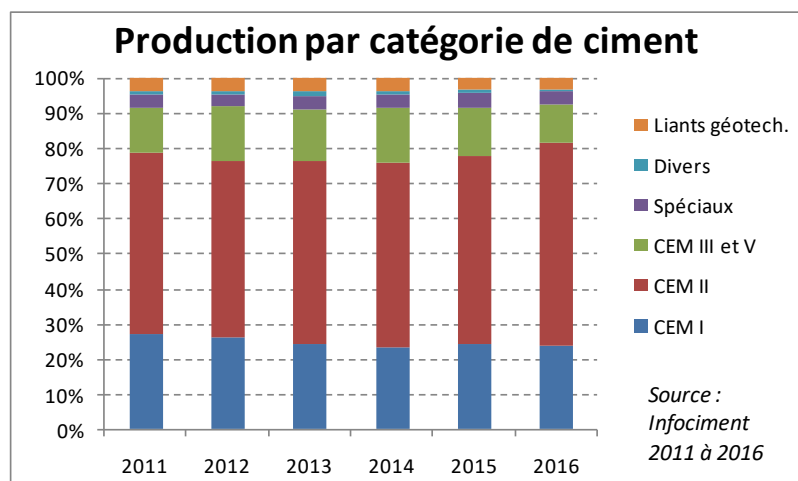


Figure 53 : Historique de la production de ciment par catégorie (Source : Infociments 2011 à 2016)

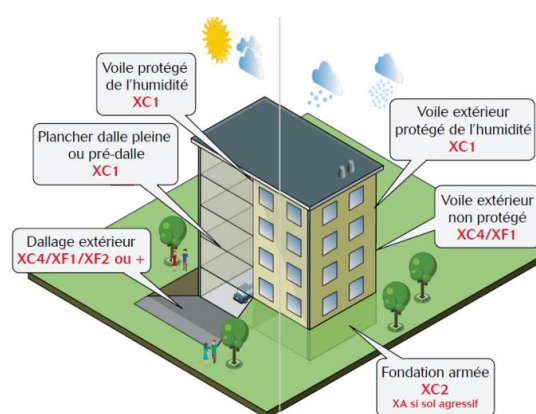


Figure 54 : Schéma descriptif des différentes classes d'utilisation du ciment (SNBPE, 2015)

En effet, a priori toutes les qualités de ciment ne sont pas utilisables pour tous les usages. Ainsi, si on se projette sur une forte pénétration de la construction bois, c'est essentiellement le béton de superstructure qui sera substitué, mais le béton d'infrastructure, de classe d'exposition XC2 ou XA ne sera pas substitué. Or le béton des fondations peut s'avérer être forcément un ciment plus intensif en clinker que la moyenne du béton du bâtiment entier. Dans ce cas on réduit la masse totale de béton, par exemple des 3/4 pour un bâtiment de 3 niveaux et 1 niveau de sous-sol, mais la quantité de clinker utilisée n'est pas réduite de 3/4, mais d'un taux plus faible. Le taux d'ajout moyen au niveau national peut en être ainsi modifié.

Cependant, n'ayant pu obtenir de corrélation claire entre classe d'exposition et catégorie de ciment dans la bibliographie, dans l'outil de modélisation¹³ de cette étude, des matrices sont créées pour être complétées ultérieurement en proposant une différenciation entre les différents usages. Pour l'instant les parts de marché de catégories de ciment sont identiques, et sont calculées directement à partir d'une hypothèse de taux d'ajout moyen.

¹³ Dans l'outil, la modélisation des taux d'adjuvant, apparaît dans l'onglet « Clinker ». Ce dernier présente des matrices de part de marché des différentes catégories de ciment pour chacun des usages, et notamment selon la classe d'exposition.



6.4. Le verre

6.4.1. Description des procédés

Le process de production utilise un mélange de matières premières qui est appelé "composition chimique". Cette composition varie selon le type et la qualité du verre. Elle comporte les éléments bruts suivants :

- Entre 55 et 80 % de sables, qui eux même, contiennent plus de 99 % de silice SiO_2 du carbonate de sodium transformés en Na_2O , mais aussi du carbonate de potassium ou de magnésium
- du calcaire transformé en CaO
- de l'oxyde de plomb ou de bore
- des oxydes d'alcali de terre
- d'autres éléments

On distingue quatre variétés de verre (EU JRC, 2013) :

- Les **verres sodocalciques** constituent la majorité des applications : bouteilles, bocaux, vaisselle ordinaire et fenêtres. Cette ample utilisation du verre sodocalcique est due à ses propriétés physiques et chimiques dont la plus importante est l'excellente transmission de la lumière, d'où son utilisation dans le verre plat et dans la fabrication d'articles transparents. Ses propriétés élastiques et thermiques sont suffisantes, pour ce type d'applications, et les matières premières sont, en comparaison, bon marché et leur fusion peu coûteuse. Le coefficient d'expansion thermique est d'autant plus élevé et la résistance au choc thermique et aux agressions chimiques plus faibles que le contenu d'alcali est élevé. Le verre sodocalcique ne convient généralement pas aux applications avec des changements de température brusques ou extrêmes.
- Le **verre au borosilicate** présente une haute résistance à la corrosion chimique et aux variations de température avec un faible coefficient d'expansion thermique. Parmi les applications de ce type de verre figurent les composants de procédés chimiques, les équipements de laboratoire, les récipients utilisés en pharmacie, l'éclairage, les récipients pour cuisson, les portes de fours et les plaques de cuisson. La plupart des formules de verres au borosilicate sont destinées à des applications techniques, à faible volume de fabrication, et rentrent dans la catégorie des verres spéciaux. Ils sont également utilisés dans la fabrication de fibres de verre à fil continu et de laine de verre pour isolation. Le trioxyde de bore permet une excellente résistance chimique et un faible coefficient d'expansion thermique.
- Le **verre « Cristal »** souvent au plomb 24% est un verre à haute densité, doté d'un indice de réfraction élevé, et donc, d'une excellente brillance et sonorité, pouvant être facilement travaillé et modelé, avec des formes et des décorations différentes. Parmi ces produits figurent les verres à boire de grande qualité, des carafes, des bols et des articles de décoration. L'oxyde de plomb peut être partiellement ou totalement remplacé par des oxydes de baryum, de zinc ou de potassium, pour la fabrication de verres, généralement appelés en cristal, moins brillants et moins sonores que ceux en verre au plomb, 24%.
- Les **verres spéciaux** constituent une catégorie extrêmement diversifiée, comprenant des produits à faible volume de production et à haute valeur ajoutée, dont la composition varie énormément, en fonction des propriétés requises. Parmi les applications figurent des produits spécifiques au borosilicate, des verres pour produits optiques, pour l'électronique, les tubes cathodiques, le verre de silice, le verre scellé, les tubes pour rayons x, le verre pour soudure, le verre fritté, les électrodes et la vitrocéramique.

Les proportions de matériaux constitutifs sont les suivantes :

Tableau 39 : Constituants dans les principaux types de verre (EU Commission, 2013)

	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O *	CaO	PbO **	Alcali
Verre sodocalcique	71 à 75%			12 à 16%	10 à 15%		
Verre borosilicate	70 à 80%	7 à 15%	2 à 7%	4 à 8%			
Fibre de verre	53 à 60%	5 à 10%	5 à 10%				20 à 24%
Verre « cristal »	54 à 65%			13 à 15%		25 à 30%	
Verre spéciaux	Très variable						

* Peut être remplacé par du K₂O ou MgO

** Peut être remplacé par de l'oxyde de Baryum, zinc ou potassium

La production comprend différentes phases décrites ci-dessous et dans la Figure 55

Préparation des matières premières

- **Fusion** : la composition est chauffée progressivement à 1300-1400°C, dans des fours continus (fours à bassin). La cuve est constituée de blocs réfractaires posés sans liant, l'étanchéité étant assurée par le verre se figeant dans les joints.
- **Affinage et homogénéisation** : Afin d'éliminer les bulles de gaz présentes dans le verre fondu, la température est élevée à 1450-1600°C pour diminuer sa viscosité. L'ajout de sulfate de sodium¹⁴ améliore l'affinage. Une agitation mécanique ou l'insufflation d'air sont parfois utilisées pour homogénéiser.
- **Braise** : Avant la mise en forme, la viscosité du verre est augmentée en diminuant la température vers 1000-1200°C.
- **Finition** : Le verre est ensuite formé pour des applications aussi diverses que le verre creux ou le verre plat

Le verre recyclé est fondu sous forme de calcin, puis peut être indifféremment mélangé à du calcin en provenance de matière première (silice et adjuvants). Le calcin nécessite une énergie de fusion moins importante que les matières premières, car les réactions chimiques endothermiques liées à l'élaboration du verre sont terminées et sa masse est inférieure de 20 % par rapport à celle de la composition équivalente (EU Commission, 2013). En règle générale, chaque ajout de 10 % de calcin supplémentaire entraîne une réduction de 2,5 à 3,0 % de la consommation d'énergie du four. L'utilisation de calcin se traduit en général par une importante économie financière, résultant d'une diminution du coût de l'énergie et de la quantité de matières premières nécessaires.

Cela signifie que le verre recyclé consomme 30% d'énergie en moins que le neuf.

La composition du calcin et surtout le procédé de formage dépend de l'usage du verre. Ainsi il faut des usines très différentes selon que l'on fabrique : du verre creux destiné à l'emballage (bouteilles et flacons) ou à la gobeletterie (vaisselle, vases)

- du verre plat destiné au bâtiment et à l'automobile (ce dernier n'est pas laminé mais déposé en surface)
- de la fibre de verre destinée à la fabrication de coques ou de laine de verre
- de verres techniques spéciaux entre autres les ampoules, le pyrex, etc.

¹⁴ <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/donnees/mine/naso/cadnaso.htm>



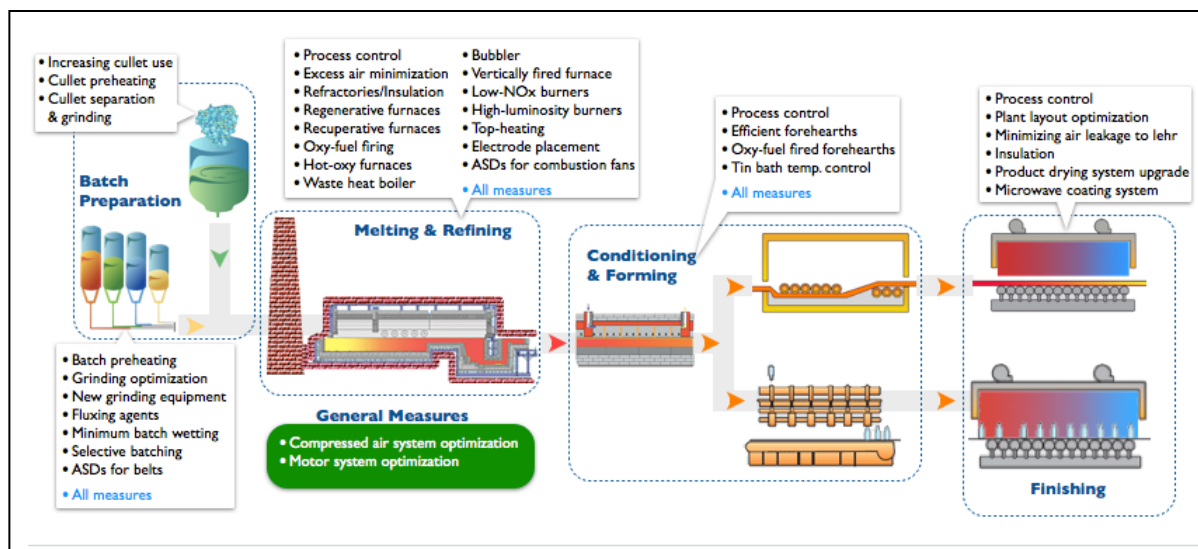


Figure 55 : Comment est fabriqué le verre? (Productivity, s.d.)

6.4.2. Situation actuelle

6.4.2.1. Production / import / export / consommation

Les tonnages en 2014 sont issus de Fedeverre (Fedeverre, s.d.), de l'ADEME (ADEME, Bilan national du recyclage 2005-2014, 2017) et d'EUROSTAT (EUROSTAT, 2014). Pour les emballages il y a une contradiction entre les chiffres de l'ADEME issus de l'INSEE et ceux de Fedeverre, : un réajustement a dû être opéré. Le tableau ci-dessous présente les résultats.

			Fedeverre		EUROSTAT / ADEME	EUROSTAT / ADEME	Calculé
			Production	Ajustement	Import	Export	Conso
E22 VERRE	kt		4 543	4 543	2 216	1 454	5 307
2311Z - Verre plat	kt		705	705	451	465	691
2313Z - Verre creux	kt	Emballages	3 100	3 200	1 379	580	4 000
	kt	Vaisselle	290	190	77	172	95
2314Z - Fibres de verre	kt		403	403	566	180	789
2319Z - Autres articles	kt		45	45	63	57	52

Tableau 40 : Production et commerce de différents types de verre

Les valeurs d'import et d'export fournis par Eurostat sont fiables en ce qui concerne les verres plats et creux cependant beaucoup de données manquent pour les autres. La consommation de fibres de verre a donc été fixée arbitrairement en fonction des quantités estimées dans le BTP par un modèle « bottom up ».

6.4.2.2. Recyclage

Seuls les verres plats et creux sont recyclés à ce jour avec des taux différents. Pour des questions de teneur et de transparence, les filières sont séparées. La collecte des verres creux se fait via les collectivités tandis que le verre plat dépend des filières de récupération liées à l'automobile et au bâtiment.

Le tableau ci-dessous présente la situation du recyclage.

Tableau 41 : Taux d'incorporation du verre pour différentes filières en 2014 (ADEME, Bilan national du recyclage 2005-2014, 2017)

kt 2014	Produit	Recyclé	Taux MPR
Verre creux	3 390	2 070	61%
Verre plat	705	305	43%
Autres	448	0	0%
TOTAL	4 543	2 375	52%

Le diagramme des flux pour verre plat et creux est le suivant

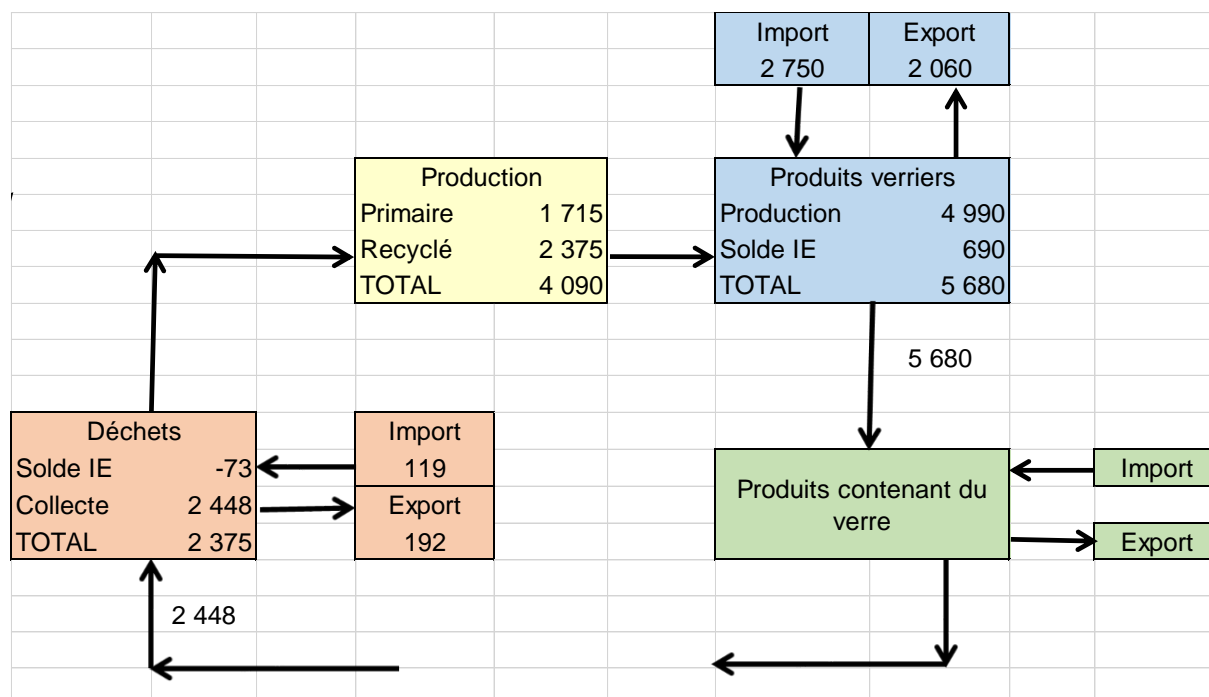


Figure 56 : diagramme des flux pour les verres creux et plats en 2014 (ADEME, Bilan national du recyclage 2005-2014, 2017)

6.4.2.3. Demande et usages

Les usages du verre sont déjà résumés dans le tableau précédent puisque les procédés de fabrication sont eux même différenciés.

A cela, il faut ajouter (entretien Fedeverre, dire d'expert) :

- Les usages du verre creux
 - 98% Emballages
 - 2% Vaisselle
- Les usages du verre plat :
 - 80% Bâtiment
 - 15% Automobile
 - 5% Autres
- Les usages fibre de verre
 - 65% Laine de verre
 - 35% Autre



6.4.3. Éléments de prospective

6.4.3.1. Évolution de la production

La demande dépend de trois secteurs principaux : emballages, bâtiment, et transport.

Le reste est minoritaire et il n'est pas prévu d'évolution particulière.

L'industrie du verre est importatrice de produits finis et pourrait être développée à l'horizon 2050.

6.4.3.2. Évolution de la part du recyclage

Etant donné que la proportion de matériaux entrants varie selon les filières, celle-ci doivent être examinées séparément. De plus, la proportion de calcin issu du recyclage est fonction de deux paramètres :

- L'efficacité de la collecte
- L'exigence de clarté du verre.

Matériau recyclé de longue date, le verre creux (emballage et gobeletterie), est très bien collecté et les refus de tri sont faibles. Les produits non-verriers (capsules, étiquettes) sont assez facilement éliminés et seule l'exigence de clarté limite la part du recyclage. Cependant, cette exigence ne s'applique qu'à certains verres blancs en gobeletterie.

La plupart des bouteilles sont colorées ou bien blanches mais avec un taux d'opacité acceptable. D'après Fedeverre, **la proportion de verre recyclé pourrait monter de 61% aujourd'hui à près de 85%.**

Pour le verre plat, le niveau de collecte est moins élevé. Dans le bâtiment, la collecte dépend des acteurs réalisant la rénovation et le changement de vitrages. Dans l'automobile (filière REP), les parebrises sont de mieux en mieux récupérés en fin de vie mais il reste les véhicules échappant à la filière et les remplacements en cours. Le facteur le plus limitant est ici celui de la clarté : mis à part quelques exceptions, le verre plat est en général « blanc » c'est à dire transparent. Aujourd'hui de 43%, ce taux pourrait monter entre 50 et 60%.

Enfin la fibre de verre n'est pas aujourd'hui recyclée. Des expériences sont menées en ce sens mais il apparaît trop hasardeux à ce stade de définir un taux de recyclage à l'horizon 2050.

6.5. Préambule sur le secteur de la chimie

La chimie est un monde complexe composé de nombreux intermédiaires interdépendants et intégrant à chaque fois des imports/exports. On peut cependant distinguer les grands sous-secteurs suivants :

- Le secteur particulier de l'ammoniac dont les usages très majoritaires sont les engrais azotés
- La chimie minérale dont les constituants de base sont :
 - Le chlore et la soude
 - Les gaz industriels (azote, oxygène, gaz rares)
 - L'acide sulfurique
 - Le noir de carbone pour les caoutchoucs
 - Le silicium
- La chimie organique dont l'intrant principal est le pétrole. Dans la pétrochimie, on craque les naphthas (pétrole distillé) pour obtenir :
 - L'éthylène à destination de différents plastiques et de glycols
 - Le propylène majoritairement pour le polypropylène
 - Les coupes C4 (butène, butadiène) à destination des caoutchoucs
 - Les coupes aromatiques (benzène, toluène, xylène) pour le polystyrène et la chimie fine

La chimie organique produit nombre de composants intermédiaires qu'il est difficile de comptabiliser, encore plus les imports / exports dont ils sont l'objet.

Les intermédiaires les plus importants en volume sont les matières plastiques auxquelles est consacré un chapitre spécifique.

La chimie fine ou dite de spécialité comprend nombre de produits de consommation tels que les peintures, encres, vernis, colles, explosifs, savons, détergents, solvants, pharmacie, etc.

La figure ci-dessous représente un schéma général de la chimie (FranceChimie, 2018)



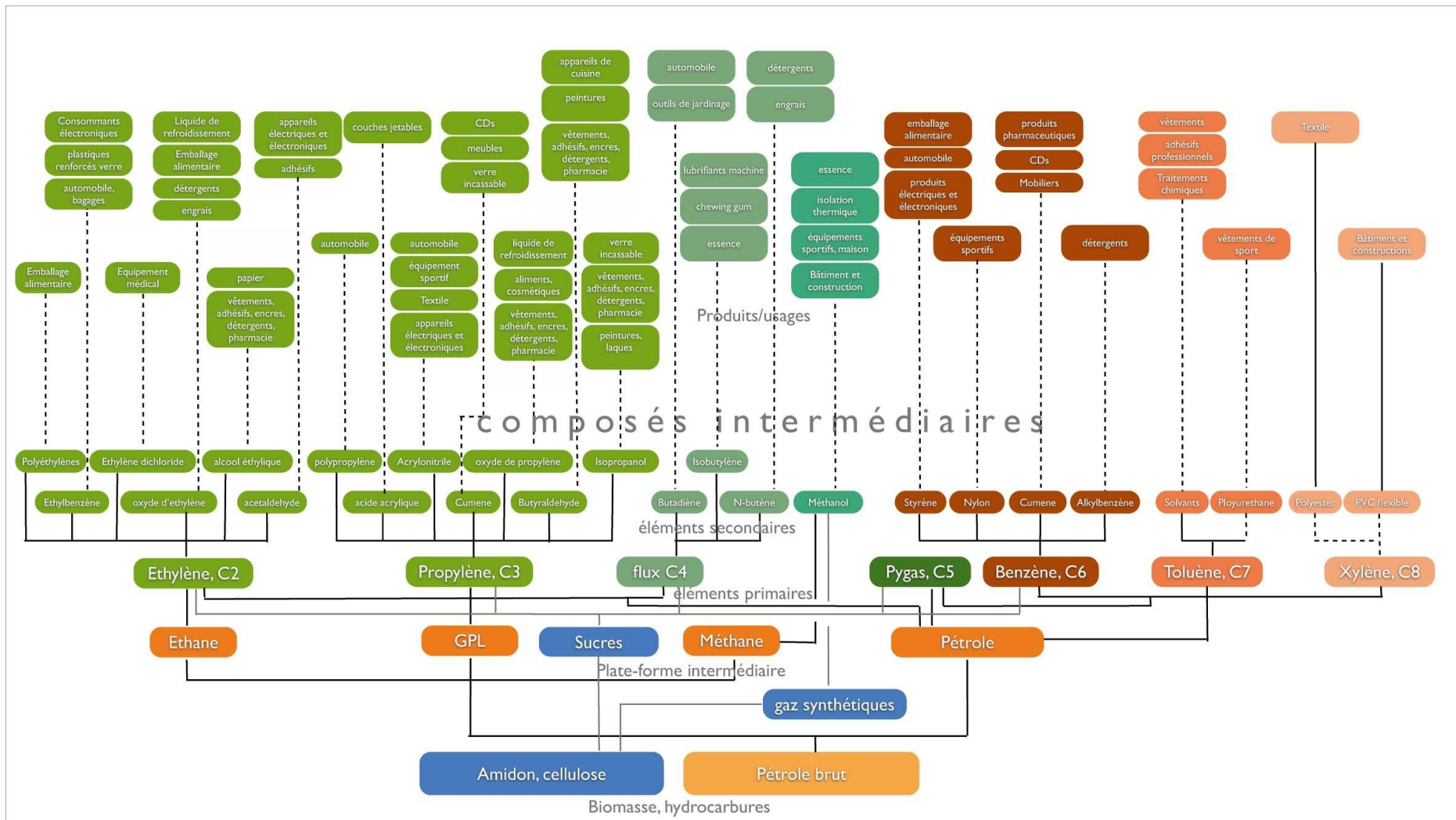


Figure 57 schéma global des intrants de la chimie des produits intermédiaires et des produits finis (Source France Chimie)

6.6. L'éthylène et les bases de la chimie organique

6.6.1. Description des procédés

Dans la tour de distillation d'une raffinerie, outre les bitumes, les carburants et le GPL, sont récupérés de l'éthane et des naphthas ou encore bases pétrochimiques. Ces bases sont utilisées non loin du lieu de production dans des vapocraqueurs pour la production de monomères puis de matières plastiques et de produits chimiques de consommation. Les pourcentages exposés dans la figure sont ceux de l'année 2014 et peuvent varier selon la nature du brut et le réglage du vapocraqueur. Cependant les ordres de grandeur restent conservés à savoir qu'un tiers de la production est dédiée à l'éthylène (C₂H₄). Ce dernier est communément cité comme produit référent mais sa production est inséparable des autres constituants.

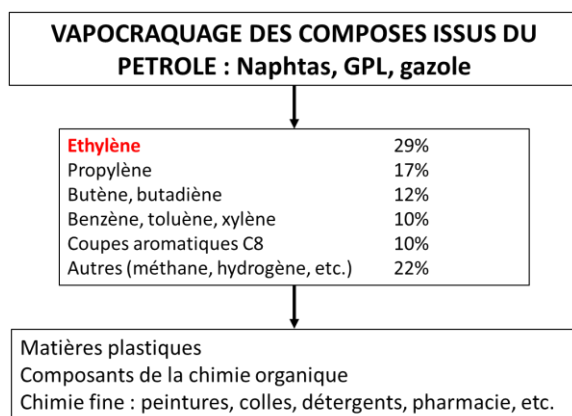


Figure 58 : schéma de base de la chimie organique (SCF S. c., Le vapocraquage, 2014)

6.6.2. Situation actuelle

6.6.2.1. Généralités

Les données disponibles pour la production sont celles d'EUROSTAT (EUROSTAT, 2014) et le SDES publié par le CGDD (CGDD, 2015). Elles sont récapitulées dans le



Tableau 42 : Comparatif des productions et du commerce de produits de base issus du vapocraquage selon diverses sources

Ce tableau illustre les écarts importants entre ce qui est « produit » et ce qui est « vendu » : une partie de la production est immédiatement convertie sur place. L'éthylène par exemple, est dangereux à transporter et beaucoup de sous-produits dont des plastiques sont réalisés dans la même usine que le vapocraqueur. D'un point de vue comptable, cet éthylène n'est pas vendu en tant que tel mais il a été nécessaire à la confection de productions intermédiaires qui seront vendues sous leur propre nom.

Cette distinction ne rend pas visible la création de stocks qui devra donc être négligée. Autrement dit la consommation calculée dans la dernière colonne est ici une consommation apparente qui ne tient pas compte d'un stockage éventuel et qui inclue des produits de transformation réalisés sur place.

Tableau 42 : Comparatif des productions et du commerce de produits de base issus du vapocraquage selon diverses sources (EUROSTAT, 2014) (CGDD, 2015)

Mt 2014	Source	Produit	Vendu	Importation	Exportation	Conso.
Ethylène	(EUROSTAT, 2014)	3,869	2,352	0,040	0,224	3,685
	(CGDD, 2015)		2,654			
Propylène	(EUROSTAT, 2014)	2,359	1,646	0,158	0,188	2,329
	(CGDD, 2015)		1,664			
Butène	(EUROSTAT, 2014)	nc	nc	0,056	0,113	
Butadiène	(EUROSTAT, 2014)	0,513	0,478	0,345	0,037	0,821
Butadiène	(CGDD, 2015) (INRS, 2017)		0,559	0,350	0,189	0,720
Autres C4	(EUROSTAT, 2014)	nc	nc	nc	nc	
TOTALC4	(CGDD, 2015)		1,156			
Benzène	(EUROSTAT, 2014)	1,139	0,906	0,141	0,157	1,124
Toluène	(EUROSTAT, 2014)	0,161	0,204	0,040	0,019	0,181
Xylène	(EUROSTAT, 2014)	nc	nc	0,008	0,001	
TOTAL BTX ¹⁵	(EUROSTAT, 2014)			0,189	0,176	
TOTAL BTX	(CGDD, 2015)		1,028			

La bibliographie consultée n'a pas permis d'établir une cartographie des usages pour la France mais seulement pour l'Europe.

Pour pallier cet inconvénient, la production de plastiques et de caoutchoucs en France ont été considérées et les quantités de matériau de base intrant ont été évaluées. Cela donne un pourcentage d'usage plastique. Pour les autres usages, un partage a été établi selon les données disponibles (en général européennes).

Le tableau ci-dessous expose les quantités de plastique produites et les quantités théoriques de produits issus du vapocraquage pour les produire.

Tableau 43 : Calcul théorique des quantités d'intrants de la chimie organique nécessaires à la production de plastiques en France à partir de données issues du

¹⁵ BTX : Benzène, Toluène, Xylène, les hydrocarbures aromatiques les plus courants



Tableau 42

	Masse mol. du maillon	Réaction	Intrants	
Polyéthylène	28 g	CH ₂ =CH ₂ → -CH ₂ -CH ₂ -	28 g d'éthylène	
PVC	62 g	CH ₂ =CH ₂ + 1/2 Cl ₂ → -C ₂ H ₃ Cl-	28 g d'éthylène	35 g de chlore
Polypropylène	42 g	C ₃ H ₆ → -C ₃ H ₆ -	42 g de propylène	
Polystyrène	102 g	C ₂ H ₄ + C ₆ H ₆ → -C ₈ H ₆ - + 2H ₂	28 g d'éthylène	78 g de benzène

2014	Pour produire→	PE	PP	PVC	PS		PE	PP	PVC	PS
		1 778 kt	1 517 kt	1 129 kt	627 kt					
	Conso tous usages	Il faut consommer pour les usages plastiques ↓				Usages totaux	Usages plastiques / usages totaux			
Ethylène	3 685 kt	1 778		510	166	100%	48%		14%	4%
Propylène	2 329 kt		1 517			100%		65%		
Benzène	1 123 kt				461	100%				41%
Xylène						100%				
Chlore	1 045 kt			637		100%			61%	

Les autres usages seront examinés pour chacun des produits dans les paragraphes suivants.

6.6.2.2. L'Éthylène

Les usages de l'éthylène sont les suivants :

Tableau 44 : Répartition des usages pour l'éthylène

ETHYLENE	Monde	Europe O	France	France	France retenu
Source	(SCF S. c., Chimie organique, 2014)	(SCF S. c., Chimie organique, 2014)	cf. §0	Calculé	Retenu
	conso C ₂ H ₄	Conso C ₂ H ₄	Prod plast kt	Conso C ₂ H ₄ kt	Conso C ₂ H ₄
Polyéthylène	61%	62%	1 778	1 778	48,2 %
PVC	10%	14%	1 129	803	13,8 %
Polystyrène	6%	7%	627	166	4,7 %
Oxyde d'éthylène	15%	11%	460	293	7,9 %
Ethanol, autres	5%	6%			10 %
Pertes ajustements					15,3 %
TOTAL	97%	100%		3 685	100%

Il reste 25% de l'éthylène qui n'est pas affecté. Les pertes ont été estimées à 15% et le reste (10%) est affecté aux produits de la chimie fine. Les usages de l'oxyde d'éthylène présentés dans le tableau suivant.

Tableau 45 : Répartition des usages de l'oxyde d'éthylène (SCF S. c., Chimie organique, 2014)

Oxyde d'éthylène	% Ox éthyl	Sous produits	% sous produit		%C ₂ H ₄
Sous produits	EU	Usages	EU	France	France
MEG	71%	PET	86%		Pas de PET
		Antigel	7,50%	5,30%	1,3%
		Chimie orga	6,50%	4,60%	1,1%
Ethoxylates	9%	Tensioactifs		9%	2,2%
DEG, TEG, PEG	7%	PU Polyesters	55%	3,80%	0,9%
		Ciments	35%	2,50%	0,6%
		Solvants lubrifiants plastifiants	10%	0,70%	0,2%
Ethanolamines	5%	Pétrole, ciment, phyto		5%	1,2%
Polyols	2%	Solvants encres peintures		2%	0,5%

TOTAL	94%		32,90%	8,0%
-------	-----	--	--------	------

Les usages de l'éthanol sont : encre, détergents, pharmacie, vêtements, papier.



Les usages de l'acétaldéhyde sont nombreux : réactifs chimiques, synthèse du caoutchouc, colorants, arômes alimentaires, adhésifs, industrie des EEE, etc. Le graphique ci-dessous propose un récapitulatif en combinant les proportions précédentes.

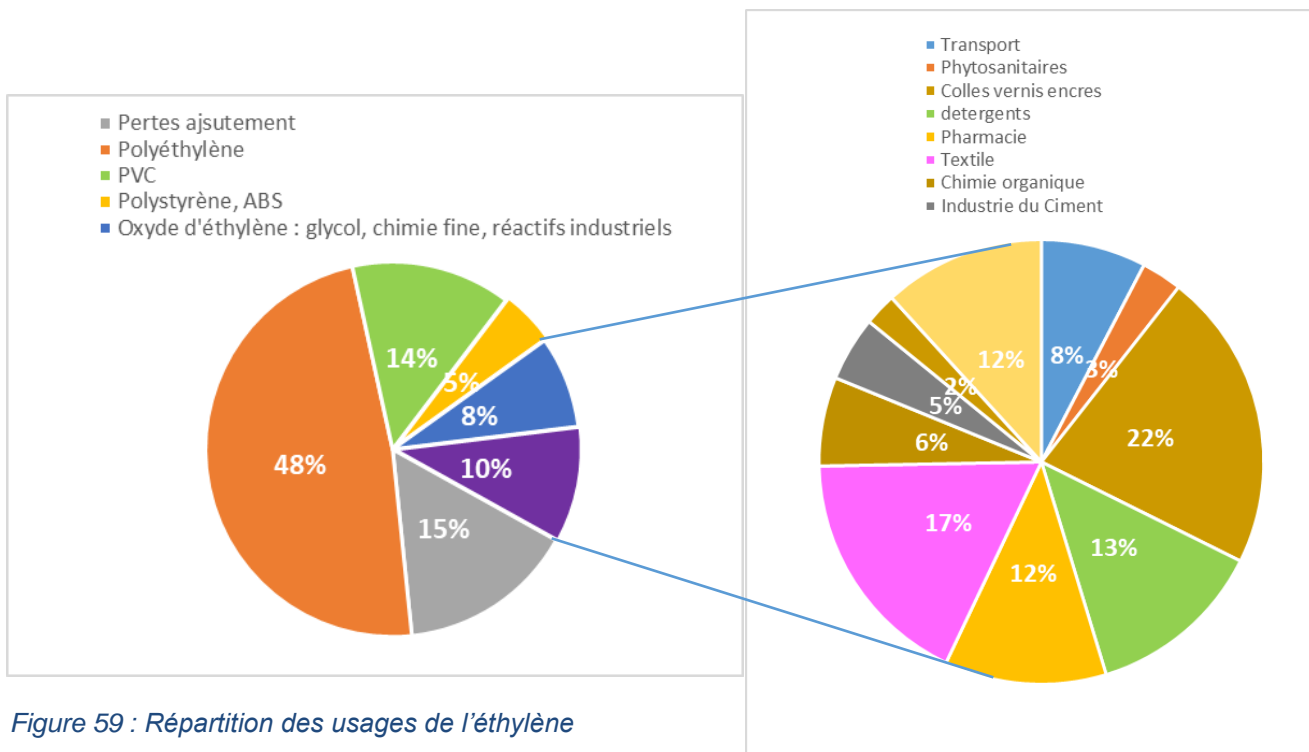


Figure 59 : Répartition des usages de l'éthylène

6.6.2.3. Le propylène

Les usages du propylène sont les suivants :

Tableau 46 : Répartition des usages pour le propylène

PROPYLENE	Monde	Europe O	France	France	France
Source	(SCF S. c., Chimie organique, 2014)	(SCF S. c., Chimie organique, 2014)	cf. §0	Calculé	Retenu
	Conso C3H6	Conso C3H6	Prod plast kt	Conso C3H6 kt	Conso C3H6
Polypropylène	64%	56%	1 517	1 517	65%
Oxyde de propylène	7%	13%			13%
Cumène	4%	7%			7%
Acrylonitrile	6%	?			10%
Pertes ajustements					5%
TOTAL	81%	76%		2 329	100%

L'oxyde de propylène sert à faire du propylène glycol comme antigel mais également dans la fabrication des encres, solvants et pour la pharmacie. Il sert également à la fabrication du polyuréthane et des polyesters. L'acrylonitrile sert de base pour des plastiques techniques tels que les ABS, SAN et acryliques. **La répartition de l'acrylonitrile et des pertes est purement arbitraire.**

Le récapitulatif des usages du propylène est le suivant :

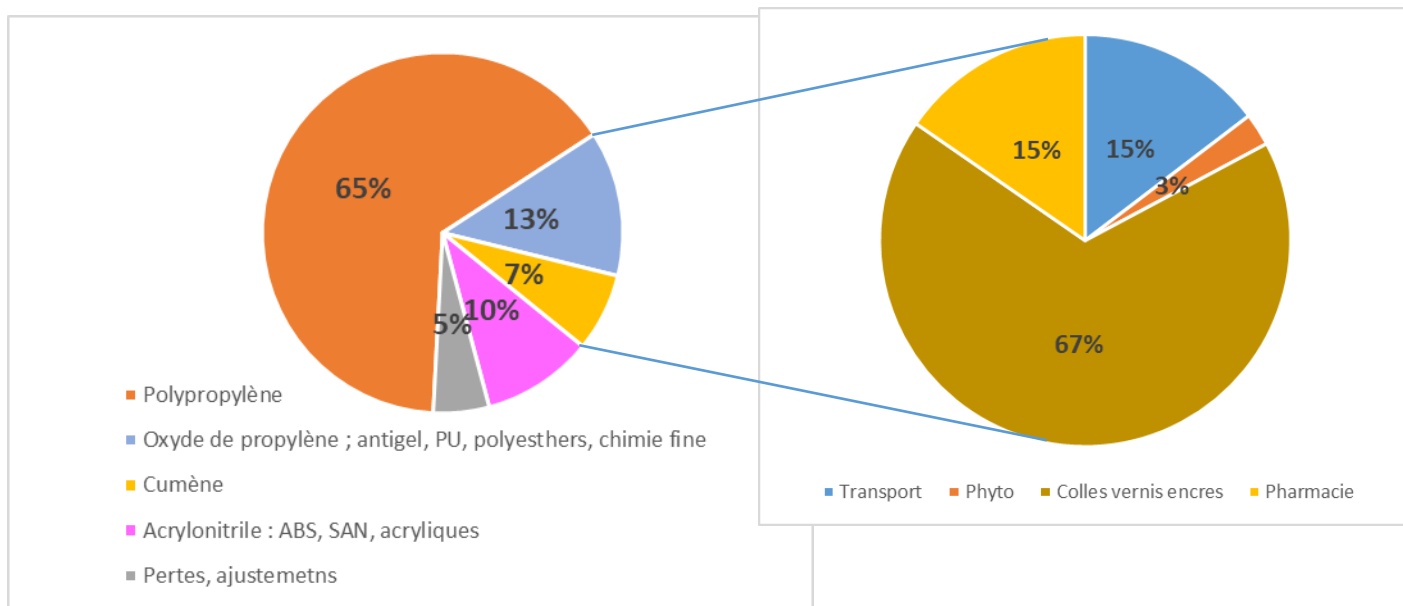


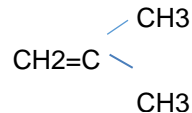
Figure 60 : Répartition des usages du propylène

6.6.2.4. Les coupes C4 et le caoutchouc

Comme leur nom l'indique, les coupes C4 caractérisent les composants de la chimie organique de la famille du butane avec quatre atomes de carbone. Pour simplifier, on limitera aux deux principaux composants à savoir :

Le butadiène de formule $CH_2=CH-CH=CH_2$

Le butène, appelé également butylène de formule



Un compromis entre les différentes sources recensées dans le



Tableau 42 nous amène aux valeurs de production suivantes :

Tableau 47 : Récapitulatif des productions et commerce des coupes C4 en 2014

Mt 2014	Source	Production	Importation	Exportation	Consommation
Butadiène	(EUROSTAT, 2014) (CGDD, 2015) (INRS, 2017)	0,559	0,350	0,189	0,720
Butène	(EUROSTAT, 2014)	0,597	0,056	0,113	0,540
Autres C4	(EUROSTAT, 2014)	négligé	négligé	négligé	négligé
TOTALC4	(CGDD, 2015)	1,156	0,406	0,302	1,260

Les usages du butadiène sont les suivants :

Tableau 48 : usages du butadiène en 2014 en France (INRS, 2017)

Usages	France 2014	Produits chimiques
Caoutchoucs	72%	
ABS	12%	
Polyamides, nylon	6%	
Produits chimiques	10%	Phytosanitaire (arbitrairement 5%)
		Réactif chimique (arbitrairement 5%)
TOTAL	100%	

Pour les usages du butylène, peu de données sont disponibles. En considérant que la production de caoutchoucs IR est de 108 kt et requière vraisemblablement 20% des 540 kt de butylène, pour les autres usages, des proportions identiques de 20% de manière arbitraire sont proposées.

On obtient alors les usages supposés du butylène ci-dessous :

Tableau 49 : usages supposés du butylène

Usages	France Kt 2014	France 2014
Caoutchoucs	108	20%
Engrais	108	20%
Détergents	108	20%
Réactifs chimiques	108	20%
Huiles	108	20%
TOTAL	540	100%

Les usages totaux des coupes C4 sont résumées dans le diagramme ci-dessous :

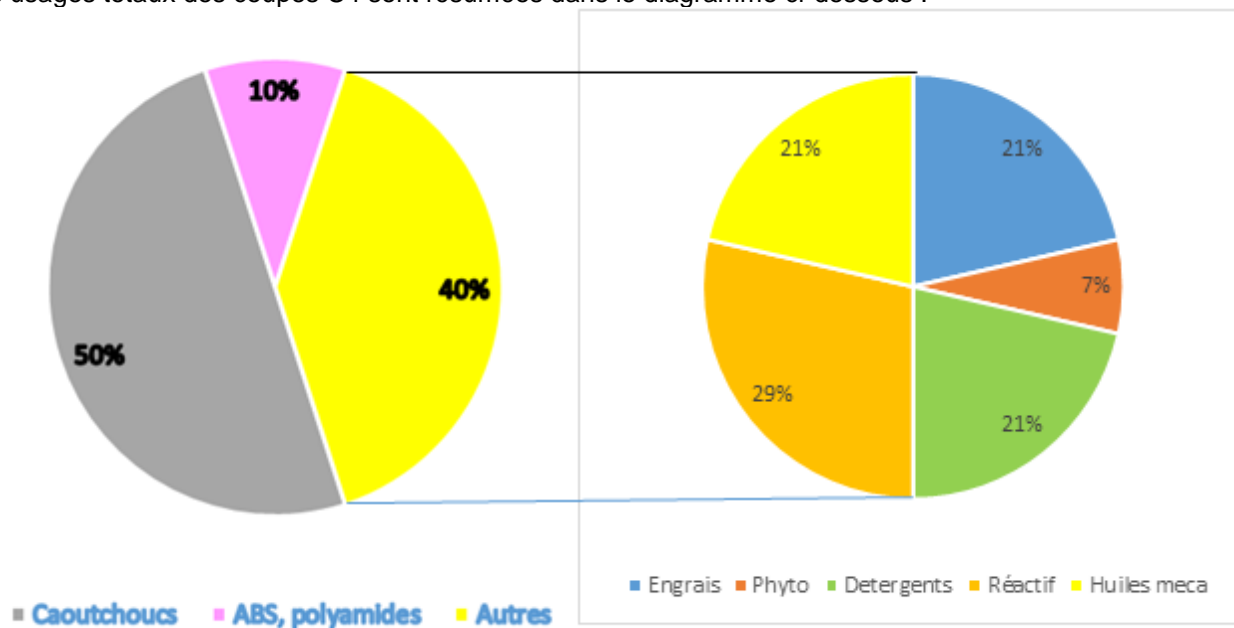


Figure 61: récapitulatif des usages pour les coupes C4

Les caoutchoucs synthétiques sont eux même combinés avec des caoutchoucs naturels non produits en France métropolitaine mais importés. Le bilan est le suivant :

Tableau 50 : Production et consommation des caoutchoucs en France (SCF S. c., Caoutchoucs, 2014)

	Prod	Import	Export	Conso
Caoutchoucs naturels		150	31	119
Caoutchoucs IR	108	24	22	110
Autres synthétiques	518	304	293	529
TOTAL	626	478	346	758

Les 758 kt de caoutchoucs consommés servent aux produits suivants :

Tableau 51 : production et consommation de pneumatiques et autres (SCF S. c., Caoutchoucs, 2014)

Kt 2014	Prod	Prod	Import	Export	Conso
Pneus	58%	440	558	333	665
Autres	42%	318	339	260	397
TOTAL	100%	758	897	593	1062



Les usages des pneumatiques sont les suivants :

Tableau 52 : Usage des pneumatiques (SNCP, 2014)

Pneus	Usage	Poids moyen d'un pneu
Tourisme	60%	7,89 kg + 20% si neuf
Poids lourds	23%	54 kg + 20% si neuf
Agraire GC	16%	
Autres	1%	
TOTAL	100%	

Tableau 53 ; Autres usages des caoutchoucs (SNCP, 2014)

Produits	en %
Mélanges	18%
Pièces adhésifs caoutchouc métal automobiles	4 %
Joints	22%
Profilés, baguettes	8 %
Tubes et tuyaux	5 %
Pièces moulées pour véhicules automobiles	4 %
Bandes transporteuses	2%
Autres produits	38 %
Total	100 %

6.6.2.5. Les BTX (benzène, toluène, xylène)

Le benzène, le toluène et le xylène sont des molécules en C6 issues du vapocraquage des naphthas. Pour cette étude, le xylène est négligé car sa production est faible au regard du benzène et du toluène.

Comme pour les autres constituants, on ne dispose pas des données d'usage pour la France mais à partir de la production de plastiques qui est connue, il est possible d'extrapoler les autres usages en les comparant avec la situation en Europe et dans le Monde.

Deuxième constituant des coupes C6, le toluène est utilisé dans le monde, pour un tiers à la synthèse du benzène, un tiers à la synthèse de xylènes (majoritairement destinés au PVC), et un tiers pour des usages spécifiques (essentiellement des solvants). Enfin le diisocyanate de toluène est destiné à la fabrication du polyuréthane. La répartition de ces usages n'est connue qu'au niveau mondial.

Tableau 54 : Usages du toluène

TOLUENE (Monde 2012)	Global	Hors benzène	XYLENE (Monde 2011)	Global	Débouché
Solvant et autres	35%	50%	Paraxylène	79%	PVC
Synthèse du benzène	30%		Orthoxylène	7%	90% PVC 10% médicaments colorants
Synthèse des xylènes	28%	40%	Métaxylène	1%	PET
Diisocyanate de toluène (TDI) : polyuréthane	7%	10%	Solvant et autres	13%	
TOTAL	100%	100%	TOTAL	100%	

La consommation de benzène en 2014 en France, représente 1 124 kt et celle du toluène 181 kt dont un tiers sert à synthétiser du benzène. Ainsi ce dernier représente environ 90 % des BTX.

Le récapitulatif des usages pour les BTX est alors :



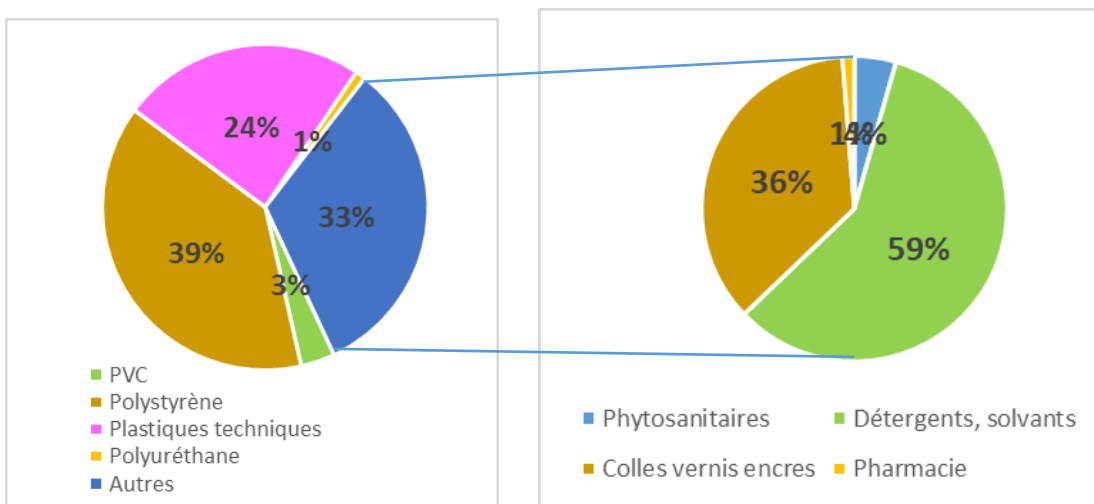


Figure 62 : récapitulatif des usages pour les BTX

6.6.3. Éléments de prospective sur la chimie organique

6.6.3.1. Évolution de la production

La demande la plus conséquente concerne les matières plastiques, matériau intermédiaire incontournable dont la demande est fonction des secteurs sensibles : bâtiment, transport, emballages. Le chapitre suivant est consacré aux plastiques.

Le reste concerne les produits chimiques de consommation : peintures, encres, colles, vernis, détergents, solvants, pharmacie, etc. Il n'est pas prévu de variation particulière de la demande sur ces produits. Ils sont surtout concernés par la balance commerciale.

Comme en témoigne le Tableau 55 ci-dessous, la production de base de la chimie organique est globalement importatrice. C'est le cas en particulier pour les pigments et colorants et beaucoup de composants de base, hormis éthylène, propylène, butène, benzène. Les résultats relatifs à la chimie fine sont analysés au § 5.2

Tableau 55 : Comparaison de la production et de la consommation (P/C) pour plusieurs composants de la chimie organique de base

Mt 2014	P/C	Produit	Import	Export	Conso
Colorants et pigments	0,43	0,104	0,251	0,116	0,239
Chimie base	0,86	9,739	6,134	4,566	11,308
Ethylène	1,05	3,869	0,040	0,224	3,685
Propylène	1,01	2,359	0,158	0,188	2,329
Butène	1,11	0,559	0,056	0,113	0,502
Butadiène	0,62	0,513	0,345	0,037	0,821
Benzène	1,01	1,139	0,141	0,157	1,124
Toluène	0,89	0,161	0,040	0,019	0,181
Méthanol	0,00		0,665	0,022	0,643
Alcool éthylique	1,53	2,189	0,238	0,994	1,433
Autres	0,46	1,381	4,442	2,812	3,012

Pour les produits de base examinés dans ce rapport, issus du vapocraquage, la situation commerciale est équilibrée à l'exception du butadiène dont 40% est importé. En revanche, 57% des colorants et pigments utilisés pour les peintures, vernis, etc. sont importés. Enfin la production des constituants de la chimie organique intermédiaires, issus ou non des oléfines, est déficitaire puisque 57% sont importés et le volume de consommation de ces constituants intermédiaires de 3 Mt ce qui n'est pas négligeable.



La demande de produits de base de la chimie organique devrait baisser en 2050, mais il existe une marge de manœuvre en répercutant cette baisse sur les importations.

6.6.3.2. Évolution du procédé

La pétrochimie est émettrice de gaz d'effet de serre et la mise en œuvre de produits biosourcés est une option intéressante à l'horizon 2050 où les contraintes économiques aujourd'hui défavorables à son développement pourraient être tout autre.

6.7. Les plastiques

6.7.1. Description des procédés

Les matières plastiques peuvent se regrouper en trois grandes familles :

- A. Les **thermoplastiques** sont en général des polymères qui fondent sous l'action de la chaleur. Cette propriété permet le recyclage d'objets à condition que leur structure soit homogène et permet l'usinage sous forme de feuilles, de tubes, d'objets moulés. Cette famille comprend la majorité des productions en masse et contient les plastiques les plus courants tels que le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC), le polystyrène (PS), le polyéthylène téréphtalate (PET)

Aujourd'hui les thermoplastiques sont fabriqués à partir de pétrole, de gaz naturel et de chlore et la chaîne de transformation pour ces plastiques est la suivante :

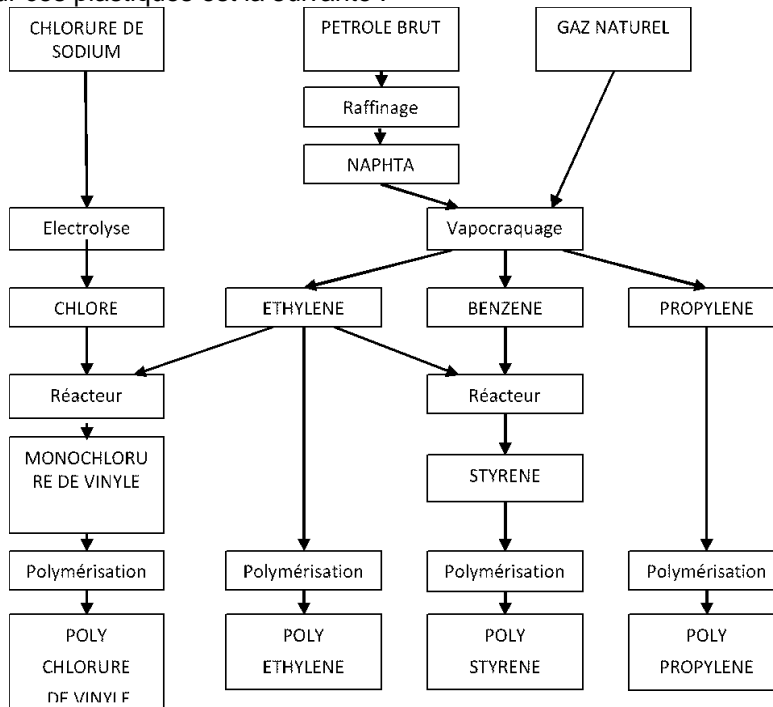


Figure 63 : Chaîne de transformation des plastiques, issu de (SCF, 2014)

- B. Les **plastiques techniques** sont également des thermoplastiques mais réservés à des applications bien ciblées : ils comprennent le polycarbonate, les dérivés du butadiène (ABS, SAN), les polyacryliques, les cellulosiques et autres.
- C. Les **plastiques thermodurcissables** acquièrent leur rigidité en se refroidissant mais contrairement aux thermoplastiques, ce procédé est irréversible. Si on les chauffe, on ne peut les mouler sous une autre forme et sont donc difficilement recyclables. Le plus connu est le polyuréthane (PU). Leurs applications, très diverses, ne concernent pas uniquement des objets ou des pièces mais également des revêtements, des vernis, des colles, des adhésifs.



Une classification plus détaillée est présentée dans le Tableau 56 :

Tableau 56 : classification des matières plastiques (PAPREC, 2019)

THERMOPLASTIQUES		Usages
1 POLYOLEFINES Polyéthylène basse densité Polyéthylène haute densité Copolymère éthylène acétate de vinyle Polypropylène	PEbd Pehd EVA PP	Sacs, films, flacons, jouets, tuyaux souples, cuvettes, citernes Colles Filtres, pompes, pare choc, réservoirs
2 POLYVINyliQUES Polychlorure de vinyle souple Polychlorure de vinyle rigide Composés PVAL, PVAC, PVDC	PVC PVC	Habillement, maroquinerie, gaines, bâches Tuyaux, fenêtres, revêtement, câbles, emballages Colles, vernis, peintures, adjuvants, films
3 POLYSTYRENIQUES Polystyrène standard Polystyrène choc Polystyrène expansé et extrudé Copolymères SAN, ABS, MBS, SBS, SIS	PS PS PSE	Barquettes, contreportes, pots alimentaires Isolation Boîtiers, boccas, filtres, capots, emballages
4 POLYACRILIQUES ET POLYMETHACRILIQUES Polyméthacrylate de méthyle Polyacrylonitrile	PMMA PAN	Fibres, verres, règles, coiffure Fibres, films, colorants, pigments
5 POLYAMIDES	PAN	Fibres, engrenages, vis, pièces, interrupteurs
6 POLYCARBONATES	PC	CD, casques, vitrages
7 CELLULOSIQUES Acétate de cellulose Nitrate de cellulose	CA CN	Fibres, vernis Celluloïd, peintures, encres colles
8 POLYESTERS LINEAIRES Polyéthylène téréphtalate Polybutylène téréphtalate Polytétraméthylène	PET PBBT	Fibres, électronique, bouteilles Pièces mécaniques
9 POLYFLUORETHENES polytétrafluoréthène polychlorotrifluoréthylène polyfluorure de vinylidène	PTFE PCTFE PVDF	Revêtements, paliers, joints, tuyaux, fibres Revêtements Revêtements
10 POLYACETALS polyoxyméthylène	POM	Engrenages, vis, pièces, robinets
11 POLYSULFONES		Peintures, vernis
12 POLYSULFURE DE PHENYLENE		Ustensiles culinaires, anti adhérent
13 POLYOXYPHENYLENE MODIFIE	PPO	Industrie

THERMODURCISSABLES		Usages
1 POLYESTERS INSATURES		Colles, vernis, objets moulés
2 PHENOPLASTES		Résines, encres, adhésifs, Garnitures
3 AMINOPLASTES		Adhésifs, formica
4 POLY-EPOXYDES		Revêtements, adhésifs, peintures
5 POLYIMIDES		Circuits imprimés, câbles
6 POLYURETHANNES	PUR	Mousses, vernis, colles, textiles
7 POLYORANOLSILOXANES		Huiles, tuyaux, pièces moulées

Le cycle de vie des plastiques les plus courants (notamment des thermoplastiques) peut être illustré par la figure suivante.

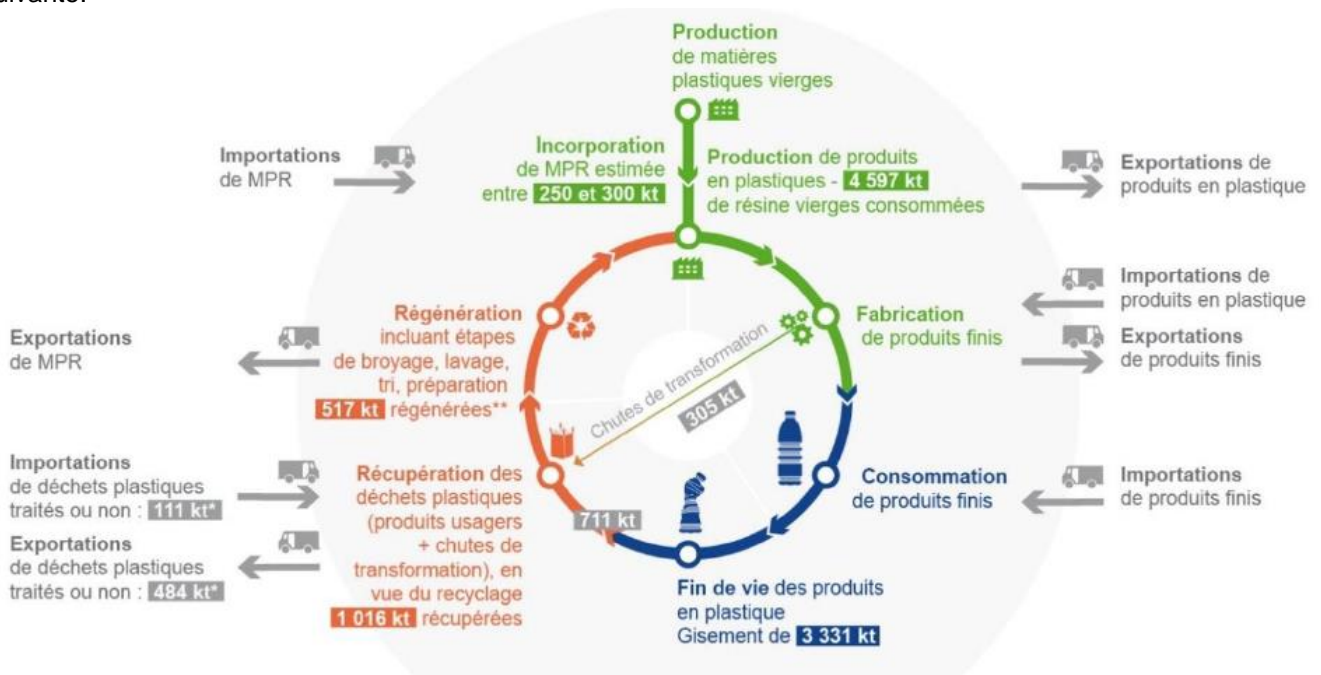


Figure 64 : Cycle de vie des plastiques en France en 2014 (ADEME, Bilan national du recyclage 2005-2014, 2017)

Au départ, à partir de monomères de base, sont produites des résines vierges sous forme de paillettes ou de petites billes. Ces résines, fabriquées par de grands groupes industriels, ne peuvent être utilisées telles quelles. Elles nécessitent de transiter par des « transformateurs » qui vont fabriquer des tubes, des plaques, des feuilles, des câbles ou des objets moulés. Ces transformateurs sont plutôt des petites et moyennes entreprises (PME).

Les usines de transformation associent également aux résines vierges des résines régénérées en provenance de déchets plastiques, donc recyclés. Souvent, ce sont des usines spécialisées dans la fabrication qui fournissent les résines recyclées, mais parfois, ce sont les transformateurs eux même qui se chargent de recevoir des déchets plastiques et de les régénérer en résines recyclées incorporées avec les résines vierges.

Dans une troisième étape, ces plastiques transformés sont incorporés dans des produits finis de consommation. La chaîne de transformation des matières plastiques est donc plus compliquée que pour les autres matériaux et il faut tenir compte de quatre étapes comprenant à chaque fois des imports / exports. (I/E)

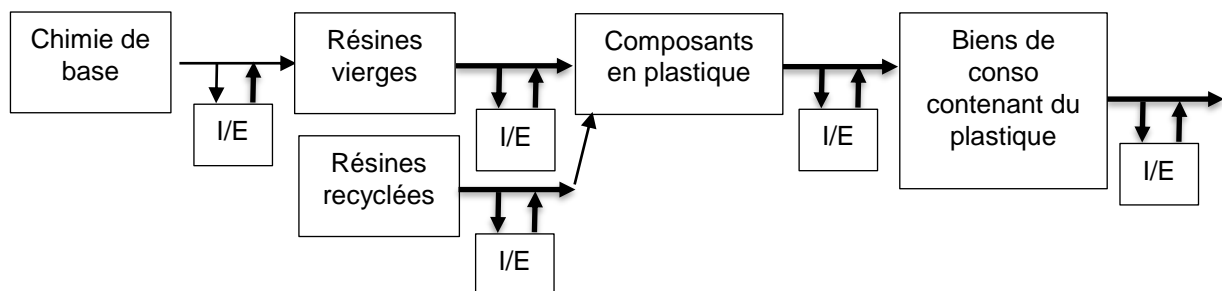


Figure 65 : Chaîne de transformation des matières plastiques



6.7.2. Situation actuelle

6.7.2.1. Production / import / export / consommation

Deux sources principales de données ont été identifiées :

- EUROSTAT (EUROSTAT, 2014) reprises par la Société Chimique de France (SCF, 2014) détaillant la production vendue, les imports et exports de résines vierges (primary form) permettant d'en déduire la consommation de matières plastiques par les transformateurs.
- Plastics Europe (Plastics Europe, 2014) détaillant également la consommation de matières plastiques vierges par les transformateurs.

Le bilan comparatif est exposé sur le tableau suivant :

Tableau 57 Bilan de production et de consommation des plastiques pour la France

	EUROSTAT / Société chimique de France						Plastics Europe
	MPV	MPV	MPV	MPV	MPV	MPV	MPV
	Prod	Stock	Vendu	Import	Export	Conso	Conso
TOTAL NAF 2016Z Plastiques	6 063	234	5 829	3 936	4 101	5 665	4 598
Polyéthylène	1 778	40	1 738	1 112	1 064	1 786	1440
Polypropylène	1 582	65	1 517	400	526	1 391	822
PVC	1 129		1 129	225	785	569	447
PS	627	80	547	187	378	356	338
PET	0		0	371	65	306	390
SOUS TOTAL Thermoplastiques	5 116	185	4 931	2 295	2 818	4 408	3 437
Plastiques techniques	754		754	956	1 172	537	287
Polyuréthane	77		74	48	53	69	307
Autres thermodurcissables	116	49	70	637	58	650	567
SOUS TOTAL Thermodurcissables	193	49	144	685	111	719	874

On constate des statistiques plutôt divergentes selon les sources. Sans pouvoir justifier chacune de ces différences Plastics Europe propose quelques éléments d'éclairage :

- Un certain nombre de résines ne sont pas vendues telles quelles aux transformateurs. Elles passent par un process de « compound » et de « masterbatch » qui consiste à ajouter des additifs ou des colorants et ces produits légèrement dérivés pourraient ne pas être enregistrés sous la forme de résines primaires
- Les données Eurostat de production doivent être relativement fiables mais il est possible que les imports exports comptabilisent de multiples entrées sorties qui ne nous permettent pas pour la consommation d'effectuer un calcul aussi simple que celui présenté ci-dessus.

La proposition retenue est celle de **conserver la valeur issue de PlasticsEurope** (Plastics Europe, 2014) pour la consommation et celles d'EUROSTAT (EUROSTAT, 2014) pour la production, et de corriger les imports / exports de telle sorte que les chiffres soient en cohérence (voir tableau complet :

Tableau 63 : Recouplement statistique entre PlasticsEurope et EUROSTAT pour les produits transformés).

6.7.2.2. Recyclage des plastiques

La filière du recyclage des plastiques est complexe car elle intervient dans plusieurs secteurs et comprend de nombreux intermédiaires. On peut distinguer quatre étapes de transformation schématisées dans la figure ci-dessous :

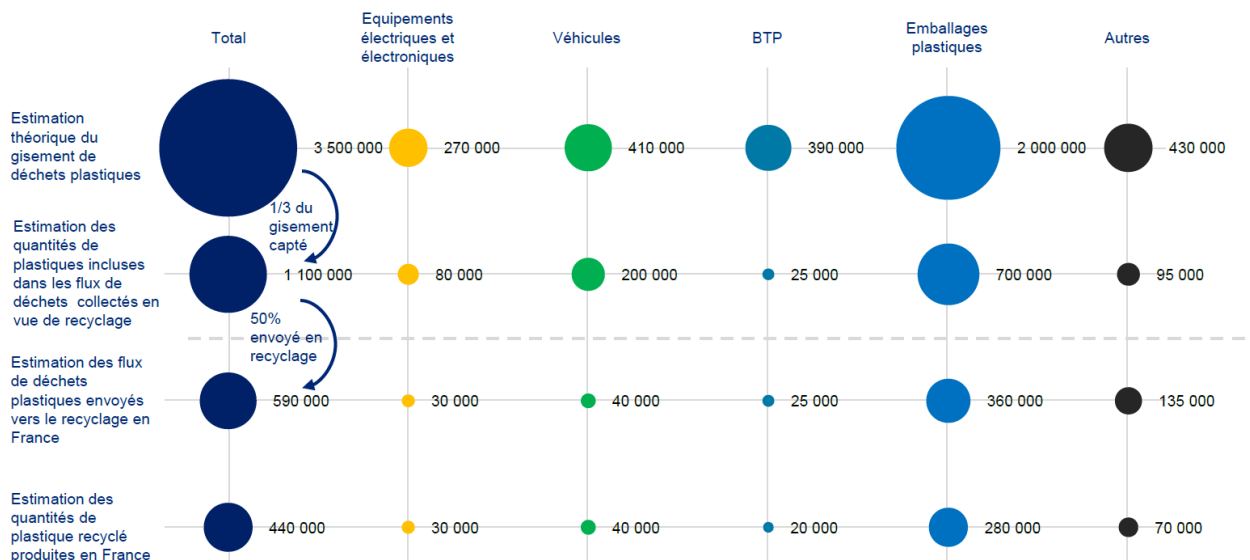


Figure 66 : Flux de déchets plastiques en France par origine en tonnes par an en 2012 (2ACR, DGE, ADEME, 2015)

Le tableau ci-dessous compare les données pour 2014 et 2012 provenant deux sources différentes.

Tableau 58 : Flux des déchets contenant du plastique et des résines recyclées

Date	2012	2014
Source	(2ACR, DGE, ADEME, 2015)	(ADEME, Bilan national du recyclage 2005-2014, 2017)
Gisement de déchet plastique	3300 kt	3331 kt
Masse collectée en vue du recyclage (sans chutes)		711 kt
Chutes de transformation		305 kt
Rendement de collecte		21%
Masse collectée en vue du recyclage (yc chutes de transformation)	1100 kt	1016 kt
Import de déchets plastiques		111
Export de déchets plastiques		484
Déchets envoyés en centre de tri	590 kt	643
Résines recyclées envoyées chez le transformateur	440 kt	517
Rendement de recyclage au tri		80%
Export / import de MPR		Entre 220 et 270 kt
Résines MPR incorporées à la fabrication		Entre 250 et 300 kt
Production de résines vierges		6063 kt
Taux d'incorporation de MPR		Entre 4 et 4,7 %

Le gisement potentiel de déchets plastiques récupérable est assez important : 3,3 Mt. Ces déchets proviennent de biens à faible durée de vie (2 Mt d'emballages), moyenne (environ 1 Mt d'automobile, EEE, divers) ou bien longue (0,4 Mt pour le BTP). Ce gisement représente 60% des 5,9 Mt de produits plastiques consommés. Ceci permet d'augurer d'un gisement plus important dans quelques années lorsque les produits créés aujourd'hui seront en fin de vie.

1^{ère} étape de transformation : la collecte en vue du recyclage.

Seulement 21% du gisement de déchets est collecté en vue du tri et du recyclage. Si on ajoute les chutes de transformation, on peut dire qu'un tiers du gisement est envoyé en centre de tri. Le reste est incinéré ou enfoui. Ce taux de collecte est très variable selon les filières. Dans l'automobile par exemple (filière à responsabilité élargie des producteurs - REP) le taux est plus élevé que la moyenne : 50 %. Dans les EEE pourtant filière REP, le taux est moins élevé : 25 %. Enfin dans le bâtiment, la récupération et valorisation matière est peu performante et seulement 6% des plastiques sont récupérés.

2^{ème} étape de transformation : le commerce de déchets plastiques

Parmi le volume de déchets plastiques collectés, seulement 50 à 60% va effectivement partir en centre de tri en France. La différence représente le solde exportateur net. La raison de ces exportations est souvent économique et technique. Il est parfois plus avantageux de vendre des déchets sur le marché qui vont partir dans des centres



de tri plus spécialisés que de les envoyer dans des centres de tri en France. C'est le cas par exemple des films plastiques.

3^{ème} étape de transformation : la valorisation du plastique en centre de tri

Les déchets qui arrivent en centre de tri sont la plupart du temps intégrés dans un objet contenant plusieurs matériaux et trié en fonction d'une filière (VHU, EEE, etc.). Contrairement au papier ou aux canettes alu par exemple, la séparation n'est pas toujours effective, et entre l'entrée et la sortie du centre de tri, le rendement de recyclage est d'environ 80%.

4^{ème} étape de transformation : le commerce de MPR

Les MPR c'est-à-dire les résines recyclées régénérées à destination des transformateurs représentent en 2014 un flux de 414 t déclarées par le SRP mais on estime (ADEME, Bilan national du recyclage 2005-2014, 2017) que le volume total est de 517 kt. Comme pour les déchets plastiques, ces résines sont sujettes à un flux exportateur net. La variabilité des cours de production (bien analysée dans la chaîne de valeur du recyclage des plastiques en France (2ACR, DGE, ADEME, 2015)) implique qu'il est parfois plus rentable de vendre ces résines sur le marché que de les valoriser en France. Certains transformateurs régénèrent eux même les résines soit pour les utiliser, soit pour les revendre. Ceci rendu délicate la connaissance des flux de matière pour la MPR. Le flux de résines incorporées dans la production est estimé entre 250 et 300 kt (ADEME, Bilan national du recyclage 2005-2014, 2017). Dans cette étude, la valeur moyenne de 275 kt est retenue.

Pour 2014, la répartition des résines déclarées par le SRP est bien connue. Faute de mieux, une répartition identique a été appliquée pour le total des résines produites et celles utilisées par les transformateurs. Cette répartition figure dans le tableau ci-dessous :

Tableau 59 : Répartition des différents plastiques dans les MPR produits et effectivement consommés en France

		MPR déclarées par le SRP	Total MPR produites	Total MPR consommées
Source		(ADEME, Bilan national du recyclage 2005-2014, 2017)	Interpolation	Interpolation
Polyéthylène (PE) Bd	kt	20	25	13
Polyéthylène (PE) Hd	kt	55	69	37
Polypropylène (PP)	kt	95	119	63
Polystyrène (PS)	kt	13	16	9
Polystyrène expansé (PSE)	kt	0	0	0
Polychlorure de vinyl (PVC)	kt	42	52	28
Polyéthylène téréphtalate (PET)	kt	187	234	124
Autres thermoplastiques	kt	1	1	1
Total déchets plastiques régénérés en MPR		414	517	275

6.7.2.3. Demande et usage des plastiques

Les usages de matières plastiques vierges à destination des transformateurs est assez bien connu et est récapitulé dans le tableau suivant (Plastics Europe, 2014).

Tableau 60 : Répartition des résines vierges consommées par les transformateurs en fonction de leur type et de leur usage pour la France (Plastics Europe, 2014)

Type de plastiques	Total		Emballages		Construction		Automobile		EEE		Autres	
	kt	%	kt	%	kt	%	kt	%	kt	%	kt	%
Thermoplastiques	3 437	75%	2 009	97%	681	77%	217	54%	94	42%	436	43%
PE-LD/LLD	820	18%	702	34%	50	6%	22	6%	24	11%	22	2%
PE-HD/MD	620	14%	459	22%	64	7%	45	11%	7	3%	45	5%
PP	822	18%	325	16%	97	11%	135	34%	47	21%	218	22%
PS+EPS	338	7%	113	5%	120	14%	0	0%	11	5%	94	9%
PVC	447	10%	20	1%	350	40%	15	4%	5	2%	57	6%
PET	390	9%	390	19%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
Plastiques techniques	287	6%	13	1%	38	4%	84	21%	74	33%	78	8%
ABS, ASA, SAN	35	1%	1	0%	0	0%	8	2%	7	3%	19	2%
PMMA	27	1%	0	0%	9	1%	5	1%	1	0%	12	1%
PA	77	2%	7	0%	5	1%	31	8%	21	9%	13	1%
PC	65	1%	2	0%	16	2%	6	2%	27	12%	14	1%
Other Engineerings	83	2%	3	0%	8	1%	34	9%	18	8%	20	2%
Thermodurs	874	19%	57	3%	168	19%	100	25%	57	25%	492	49%
PUR	307	7%	2	0%	80	9%	62	16%	27	12%	136	14%
Other Plastics	567	12%	55	3%	88	10%	38	10%	30	13%	356	35%
Total	4598	100%	2079	100%	887	100%	401	100%	225	100%	1006	100%

Le secteur « autres » appelé aussi « divers » comprend des objets de consommation courante qui n'appartiennent ni aux emballages, ni au bâtiment, ni aux EEE. On retrouve dans cette catégorie des articles de sport, des jouets, des vêtements et également les adhésifs considérés comme des composés plastiques.

A ce total de 4 598 kt, il faut ajouter 275 kt de MPR, soit en tout 4 873 kt de résines. Faute de données détaillées, la répartition de typologie et d'usage qui intègre les résines issues du recyclage a été interpolée. Les résultats de cette interpolation se trouvent dans le tableau suivant.

Tableau 61 : Répartition par interpolation du total des résines MPV et MPR

Conso de résines	PE	PP	PVC	PS	PET	Autres thplast	PU	Autres Thdurs	TOTAL
MPV	1440	822	447	338	390	287	307	567	4598
MPR	50	63	28	9	124	1	0	0	275
MPR+MPV	1490	885	475	347	514	288	307	567	4873
EEE	32	51	5	11	0	74	27	30	231
Transport	69	145	16	0	0	84	62	38	415
Divers	69	235	61	97	0	78	136	356	1 031
Emballages	1201	350	21	116	514	13	2	55	2 273
BTP	118	104	372	123	0	38	80	88	924
TOTAL	1421	650	414	250	514	210	171	211	4 873



Avant de passer des résines aux produits finis, il faut intégrer les flux de produits semifinis récapitulés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 62 : Répertoire et commerce de produits plastiques transformés (EUROSTAT, 2014)

	Vendu	Import	Export
2221Z - Fabrication de plaques, feuilles, tubes et profilés en matières plastiques	incomplet	1 339	606
2222Z - Fabrication d'emballages en matières plastiques	incomplet	658	445
2223Z - Fabrication d'éléments en matières plastiques pour la construction	incomplet	373	193
2229A - Fabrication de pièces techniques à base de matières plastiques	incomplet	136	93
2229B - Fabrication de produits de consommation courante en matières plastiques	incomplet	264	78
Chutes de transformation	305		
TOTAL	4 873	2 770	1 435

On dispose alors des quantités de résines contenues dans les produits fabriqués et consommés et leur répartition par produit semi fini mais pas par type de résine (PE, PP, PS, etc.) ni par usage final (BTP, EEE, etc.). Pour y parvenir, un travail de recouplement a été réalisé en émettant un certain nombre d'hypothèses :

- Les emballages sont bien identifiés avec le secteur 2222Z et constituent un ensemble homogène
- Le secteur 2223Z relatif à la construction comprend les menuiseries en PVC, les revêtements (linoléum) et les sanitaires en plastiques mais ne comprend pas les tubes d'alimentation et d'évacuation ni les plaques d'isolation qui sont comptabilisés dans le secteur 2221Z. Une répartition plausible a été estimée à partir de données Eurostat
- Le secteur 2229A « pièces techniques » comprend surtout des adhésifs
- Les chutes sont réparties proportionnellement à chacun des secteurs

Le recouplement statistique des données PlasticsEurope de consommation de résines MPV additionnées des MPR et de la production Eurostat de composants plastiques est récapitulée dans le tableau ci-dessous. On observera qu'ont été prise en compte les 305 kt de chutes qui retournent au recyclage

Tableau 63 : Recouplement statistique entre PlasticsEurope et EUROSTAT pour les produits transformés

PRODUCTION	TOTAL	Tubes plaques	Emballages	Construction	Technique	Conso courante	Chutes
EEE	231	217					14
Transport	415	389					26
Divers	1 031	794			62	110	65
Emballages	2 272		2 130				142
BTP	924	391		475			58
TOTAL	4 873	1 791	2 130	475	62	110	305
Imports	2 112	1 339	*	373	136	264	
Exports	970	606	*	193	93	78	
CONSOMMATION		Tubes plaques	Emballages	Construction	Technique	Conso courante	Chutes
EEE	306	306	0	0	0	0	
Transport	548	548	0	0	0	0	
Divers	1 520	1 119	0	0	105	296	
Emballages	2 130	0	2 130	0	0	0	
BTP	1 206	551	0	655	0	0	
TOTAL	5 710	2 523	2 130	655	105	296	

* Pour une question méthodologique, les emballages sont un produit fini dont les imports/exports sont comptabilisés ailleurs dans l'outil de calcul

Il faut ensuite répartir ces chiffres de consommation de produits transformés entre les différents polymères en respectant au mieux les totaux pour chaque secteur. On note que pour les emballages, les chiffres de l'INSEE donnent un volume plus faible (1825 kt au lieu de 2130 kt). Cette répartition s'est faite secteur par secteur en fonction des données disponibles. Lorsque la répartition n'est pas connue, elle a été interpolée sur la base de celle observée pour la consommation de résines chez les transformateurs. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant.

Tableau 64 : répartition pour chaque famille d'usages des différents plastiques à travers la consommation de produits plastiques transformés

Conso de produits transformés	PE	PP	PVC	PS	PET	Autres thplast	PU	Autres Thdurs	TOTAL
EEE	42	67	7	15	0	98	36	40	305
Transport	134	211	28	0	0	87	84	0	543
Divers	102	346	89	142	0	115	201	195	1 190
Emballages	951	269	16	85	452	9	1	40	1 825
Bâtiment	161	161	446	362			91		1 221
TP et ER	23		74						97
Chimie autre								330	330
Pertes	125		3	24	30	4		11	197
TOTAL	1 539	1 055	664	628	482	313	413	616	5 710

En résumé, les usages relatifs aux plastiques sont les suivants :

Tableau 65 : répartition des usages à la production et à la consommation de plastiques transformés

	Production de produits transformés	Consommation de produits transformés
Emballages	47%	37%
Construction	19%	21%
Transport	9%	10%
EEE	5%	5%
Autres	21%	27%

6.7.2.4. Import / export

La production de résines est un secteur très exportateur. En 2014, ont été produites 6,06 Mt de MPV auxquelles il faut ajouter 0,52 Mt de MPR avec une consommation à l'usage des transformateurs de 4,60 Mt de MPV pour 0,27 de MPR.

Le ratio global P/C (Production / consommation) est de 1,35. En revanche, la production de composants transformés est légèrement déficitaire (P/C = 0,85). L'activité globale est néanmoins exportatrice nette. Si l'on prend en compte la quantité de plastique totale consommée à travers les biens de consommation y compris ceux importés, on trouve une valeur de 7 Mt.

6.7.3. Eléments de prospective

6.7.3.1. Évolution de la production

La demande est fonction des biens finis de consommation. Comme il ne s'agit ici que d'un matériau intermédiaire, cette demande est analysée dans les chapitres relatifs aux secteurs finaux. Aucun élément n'a été identifié au cours de l'étude quant à de possibles évolutions de la production.

6.7.3.2. Évolution de la part du recyclage

En 2014, le taux d'incorporation de MPR parmi les résines utilisées par les transformateurs, est entre 4 et 4,7% compte tenu de l'incertitude sur le commerce de ces MPR. Comme nous l'avons vu plus haut, ce très faible taux est dû à un taux de collecte insuffisant, un taux de recyclage au tri amélioré et à des conditions économiques qui favorisent l'export de déchets plastiques comme de résines recyclées.

Le taux de collecte est de 21% en 2014, et une comparaison avec d'autres pays européens (



Tableau 66) laisse supposer que celui-ci est nettement améliorable pour atteindre 40% en 2050.



Tableau 66 : Demande de matières plastiques, gisements de déchets et taux de recyclage en UE en 2014 (ADEME, Bilan national du recyclage 2005-2014, 2017)

	Demande (Mt) de résines	Gisement (Mt) de déchets plastiques	Taux de recyclage	Taux de valo. énergétique	Taux de mise en décharge
Allemagne		4,8	38 %	61 %	1 %
Espagne		2,2	34 %	16 %	50 %
Pays-Bas		0,85	30 %	69 %	1 %
UE-28	47,8	25,8	30 %	40 %	31 %
Royaume-Uni		3,65	29 %	31 %	41 %
Pologne		1,54	25 %	19 %	56 %
France	4,6	3,3	21 %	42 %	36 %

Le gisement de déchet est aujourd'hui de 3,3 Mt et correspond à la consommation de matières plastiques plusieurs années en arrière. Le gisement potentiel des décennies à venir devrait être assez stable et avoisinerait les 7 Mt. Un taux de collecte de 40% et de recyclage au tri de 90% pourrait permettre une production de MPR autour de 2,5 Mt soit 50% environ de la production en 2050.

Il faut cependant être vigilant sur la signification d'un tel chiffre. Si la production de biens finis contenant des matières plastiques et la production de biens semi finis se relocalisent en 2050, la production s'approcherait des 7 Mt ce qui diminuerait le taux d'incorporation des MPR et le rapprocherait de l'efficacité de récupération (taux de collecte x taux de recyclage au tri) à $0,40 \times 0,90 = 36\%$.

Une prospective plus fine devrait analyser les taux de récupération filière par filière et de manière concomitante polymère par polymère. Les thermodurcissables peuvent être toutefois supposés non recyclables en 2050.



6.8. Le dichlore (Cl₂)

6.8.1. Description des procédés

Le dichlore est produit par électrolyse de solution de chlorure de sodium (NaCl) ou de chlorure de potassium (KCl) selon les réactions :

- $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 0,5 \text{ Cl}_2 + \text{NaOH} + 0,5 \text{ H}_2$
- $\text{KCl} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 0,5 \text{ Cl}_2 + \text{KOH} + 0,5 \text{ H}_2$

Diverses technologies d'électrolyse existent :

- Mercure
- Diaphragme
- Membrane

Les rendements matière sont les mêmes et fixés par les bilans de réaction, ainsi 1 t de dichlore nécessite 1,65 t de NaCl, 0,51 t d'eau et co-produit 1,13 t de NaOH¹⁶ et 0,03 t d'hydrogène (Tableau 67). Dans le cas de l'électrolyse de solution de KCl la consommation de KCl est de 2,1 t et la co-production de KOH¹⁷ est de 1,58 t (Tableau 68).

Tableau 67 : Bilan matière production chlore par électrolyse de solution de NaCl

Intrants	NaCl	t/tCl ₂	1,65
	Eau	t/tCl ₂	0,51
Produits	Cl ₂	t/tCl ₂	1
	NaOH	t/tCl ₂	1,13
	H ₂	t/tCl ₂	0,01

Tableau 68 : Bilan matière production chlore par électrolyse de solution de KCl

Intrants	KCl	t/tCl ₂	2,1
	Eau	t/tCl ₂	0,51
Produits	Cl ₂	t/tCl ₂	1
	KOH	t/tCl ₂	1,58
	H ₂	t/tCl ₂	0,01

NaOH (Hydroxyde de sodium) est un produit facile à stocker, exporter ou importer et peut être produit par d'autres voies, sa demande n'est donc pas un déterminant majeur pour la production de dichlore.

En France, l'hydrogène coproduit est valorisé sur site en usage matière à hauteur de 35-40%, en usage combustion pour environ 45%. 15 à 20% reste aujourd'hui non valorisé (GRDF; ADEME; Solagro, 2017).

Différentes technologies d'électrolyses peuvent être mises en œuvre, le bilan matière est similaire, cependant les performances énergétiques sont différentes. Elles sont données à titre d'information dans le tableau suivant.

Tableau 69 : Performances énergétiques des différents procédés d'électrolyse pour la production de dichlore (SCF Société Chimique de France, 2015b)

Procédé	Consommation totale d'énergie (kWh/tCl ₂)		
	Électrolyse	Concentration	Force Motrice
Mercure	3360	0	200
Diaphragme	2720	610	250
Membrane	2500	180	140

La réglementation européenne (EU 2017/852) interdit depuis fin 2017 l'électrolyse à mercure. Le tableau suivant présente la liste des sites de production français en 2017. Les sites Lareva et Loos ont désormais réalisé leur conversion vers la technologie membrane. Le site de Pomblière, est une usine de production de sodium qui coproduit du dichlore, il s'agit donc d'un tout autre procédé qui ne vise pas la production de dichlore. Harbonnières n'a pas fait sa conversion¹⁸.

¹⁶ Hydroxyde de sodium, aussi appelé soude caustique

¹⁷ Hydroxyde de potassium, aussi appelé potasse caustique

¹⁸ Fin 2018, unité à l'arrêt et en liquidation judiciaire

Tableau 70 : Liste des sites de production de dichlore en France en 2017 (EuroChlor, 2016)

Site	Exploitant	Capacité en (ktCl ₂ /a)					part capacité
		Total	Mercure	Diaphragme	Membrane	Autre	
Thann	PPC	43			43		3%
Pont de claix	Vencorex	170		170			12%
Fos	Kem One	340		179	161		23%
Jarrie	Arkema	72			72		5%
Lavera	Kem One	363	164	199			25%
St Auban	Arkema	20			20		1%
Pomblière	MSSA	42				42	3%
Harbonnières	PC Harbonnières	23	23				2%
Tavaux	INOVYN	360			360		25%
Loos	PC Loos	18	18				1%
Total		1451	205	548	656	42	100%

6.8.2. Situation actuelle

6.8.2.1. Production/import/export/consommation

Les seules données statistiques sont fournies par la société chimique de France (SCF Société Chimique de France, 2015b), et sont résumées dans le tableau suivant et illustrés en Figure 67

Tableau 71 : Bilan du dichlore en France¹⁹

France		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Production	kt/a	1 104	969	719	1 059	1 106	1 000	980
Importation	kt/a	3	7	12	12	13	9	16
Exportation	kt/a	80	78	72	65	74	77	75
Consommation	kt/a	1 028	898	659	1 005	1 044	933	921

Sources : ProdCom Calcul

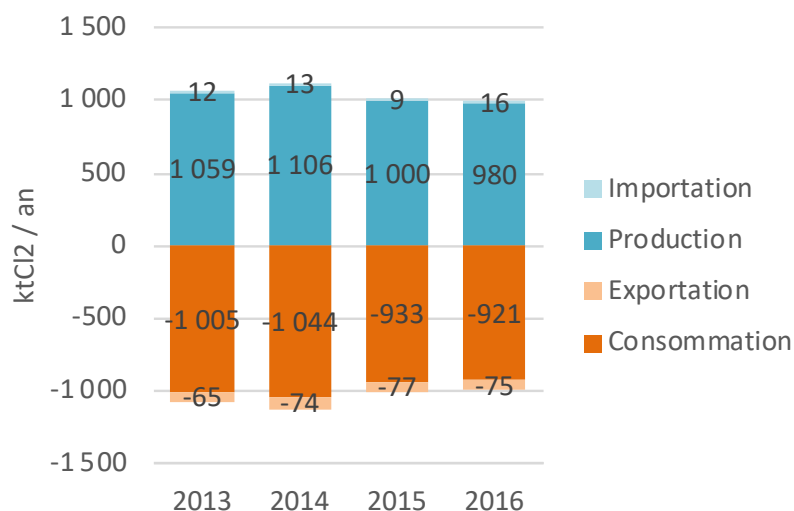


Figure 67 : Bilan d'approvisionnement en dichlore

Sur les dernières années, la production française de dichlore est équivalente à la consommation et de l'ordre de 1000 ktCl₂ / an.

¹⁹ ProdCom



Le dichlore est un produit dangereux qui se transporte difficilement. En Europe, 97 %²⁰ de la production est transformée sur son site de production. On observe que c'est le cas également pour la France dont les importations représentent moins de 1 % et les exportations moins de 8% de la production nationale.

6.8.2.2. Demande

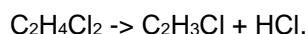
Eurochlor publie un bilan à l'échelle européenne de l'utilisation du dichlore (voir Tableau 72). Les données françaises ont été reconstituées à partir principalement des données ProdCom et de données fournies par KEMONE. Le Tableau 72 présente la synthèse de l'évaluation des usages de chlore en France et la compare également à celle à la maille européenne faite par EUROCHLOR.

Tableau 72 : Utilisation du dichlore ; Données : (EuroChlor, 2016), ProdCom²¹

Part de marché		Produit	Détails	Données France	Ratio P/C
EU	FR				
33%	53%	PVC	Polychlorure de Vinyl	ProdCom	1,3
32%	7%	Isocyanates - oxygenates	Production de plastique non chloré :ex polyuréthane Pesticides	Bilan + KEMONE	?
14%	16%	Produits inorganiques	Désinfectants, traitement de l'eau, pigments, en particulier hypochlorite	ProdCom (Hypochlorite)	1,0
9%	4%	Autres produits organiques		ProdCom	1,0
5%	5%	Epichlorohydrine	Résine époxy (majoritaire) Pesticides Autres usages	Par bilan + KEMONE	?
4%	3%	Chlorométhane	Silicone et cosmétiques	ProdCom	?
	4%	Dichlorométhane	CH ₂ Cl ₂ (DCM) : procédés pharmaceutiques, chimie fine	ProdCom	3,8
	4%	Trichlorométhane	Principalement production PTFE (téflon)	ProdCom	1,0
3%	4%	Solvants	<ul style="list-style-type: none"> • Perchlorethylène, C₂Cl₄ (PER) : <ul style="list-style-type: none"> o synthèse d'hydrocarbures fluorés et de polymères fluorés. o le nettoyage textile et pièces métalliques o La régénération de catalyseurs dans l'industrie pétrolière • Trichloréthylène, C₂Cl₃H (TRI) : matière première pour la production d'autres composés chimiques tels que des hydrocarbures fluorés (fluide frigorigène) 	Données France	?

6.8.2.3. Zoom sur le PVC

Le PVC (Polychlorure de vinyle) est produit par polymérisation du chlorure de vinyle monomère (CVM). En Europe, le CVM (C₂H₃Cl) est produit par pyrolyse du dichloroéthane (EDC ; C₂H₄Cl₂) , selon la réaction :



L'EDC peut être produit par deux voies :

- Chloration de l'éthylène : C₂H₄ + Cl₂ => C₂H₄Cl₂
- Oxychloration de l'éthylène : C₂H₄ + 2 HCl + 1/2 O₂ => C₂H₄Cl₂ + H₂O

En France, en 2014, la production de PVC est de 1 170 kt/an (voir Tableau 73) ; il est produit principalement à partir de CVM français (seulement 225 kt/an importé). La France produit donc environ 930 kt/an de CVM²², contenant 57 % de Chlore soit une consommation de 534 kt_{Cl}/an pour la production nationale de PVC. La part d'utilisation du dichlore dans le PVC est donc estimée à 53 % en 2014 soit une valeur nettement supérieure à la moyenne européenne.

²⁰ Eurochlor

²¹ les données 2016 ont été utilisées car beaucoup plus complètes que 2014.

²² la statistique ProdCom n'affiche pas de production française CVM, probablement car la production CVM est principalement interne et intégrée aux sites de production de dichlore + PVC.

Tableau 73 : Bilan PVC et Chlorure de vinyle monomère

PVC		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Production	kt/a	1 563	1 166	861	1 092	1 169	1 149	1 166
Importation	kt/a	235	236	203	204	225	231	203
Exportation	kt/a	739	695	750	701	785	727	804
Consommation	kt/a	1 059	706	314	595	610	654	566

chlorure de vinyle monomère (CVM)		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Production	kt/a	0	0	0	0	0	0	0
Importation	kt/a	260	306	226	228	232	244	305
Exportation	kt/a	0	0	0	0	0	0	0
Consommation	kt/a	260	306	226	228	232	244	305

Production estimée CVM	kt/a	1 303	860	635	863	937	906	861	(1)
	ktCl/a	742	490	362	492	534	516	491	
Part consommation Cl ₂	ktCl/a	72%	55%	55%	49%	51%	55%	53%	

(1) production PVC - consommation CVM (PrdCom)

Source : ProdCom Calcul

6.8.3. Éléments de prospective

6.8.3.1. Évolution de la production

La demande en aval est directement liée aux principaux secteurs utilisateurs. La proposition retenue est résumée sur le Tableau 81.

Le dichlore est un produit dangereux qui se transporte très peu. En conséquence il est peu probable que les imports/exports évoluent sensiblement.

6.8.3.2. Recyclage et récupération

La production de polyuréthane nécessite l'utilisation d'isocyanates (2^{ème} usage du Chlore en Europe, voir Tableau 72), eux-mêmes produits à partir de phosgène (COCl₂). Lors de la production d'isocyanate, le chlore est récupéré sous forme de d'acide chlorhydrique (HCl). En Europe, le producteur allemand COVESTRO²³ a mis en place une unité de récupération de dichlore à partir de HCl (procédé ODC). Cette intégration est rendue possible par la concentration sur un même site de flux importants de HCl et d'utilisation de Cl₂. Des investigations supplémentaires seraient nécessaires pour comprendre à quelles conditions ce type de procédé pourrait être mis en œuvre en France.

²³<https://www.thyssenkrupp-uhde-chlorine-engineers.com/en/references/hcl-electrolysis-odc-technology/>



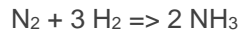
Tableau 74 : Liens vers les secteurs aval de la consommation de dichlore

Produit	Détails	Lien secteur aval
PVC	Polychlorure de Vinyl	PVC
Isocyanates - oxygenates	Production de plastique non chloré :ex polyuréthane Pesticides	PU
Produits inorganiques	Désinfectants, traitement de l'eau, pigments, en particulier hypochlorite	Détergents
Autres produits organiques		Chimie organique
Epichlorohydrine	Résine époxy (majoritaire) Pesticides Autres usages	Parachimie
Chlorométhane	Silicone et cosmétiques	Plastique
Dichlorométhane	CH ₂ Cl ₂ (DCM) : procédés pharmaceutiques, chimie fine	Parachimie
Trichlorométhane	Principalement production PTFE (téflon)	Plastique
Solvants	<ul style="list-style-type: none"> • Perchlorethylène, C₂Cl₄ (PER) : <ul style="list-style-type: none"> o synthèse d'hydrocarbures fluorés et de polymères fluorés. o le nettoyage textile et pièces métalliques o La régénération de catalyseurs dans l'industrie pétrolière • Trichloréthylène, C₂Cl₃H (TRI) : matière première pour la production d'autres composés chimiques tels que des hydrocarbures fluorés (fluide frigorigène) 	Chimie organique

6.9. L'ammoniac

6.9.1. Description du/des procédés

La production industrielle de l'ammoniac (NH_3) se fait par le procédé Haber-Bosch en combinant azote et hydrogène selon la réaction :



Pour 1 t d'ammoniac (660 Nm^3), il faut donc 820 kg (660 Nm^3) d'azote et 180 kg (1970 Nm^3) d'hydrogène.

En France, l'hydrogène est produit par vaporeformage de méthane (Gaz naturel). L'azote est apporté par l'air. Le procédé coproduit du dioxyde de carbone, correspondant au carbone apporté par le méthane. L'ensemble du procédé est résumé sur la Figure 68.

Dans ce procédé, la réaction stœchiométrique globale à partir du méthane (principal constituant du gaz naturel) peut donc s'écrire selon les équations suivantes :

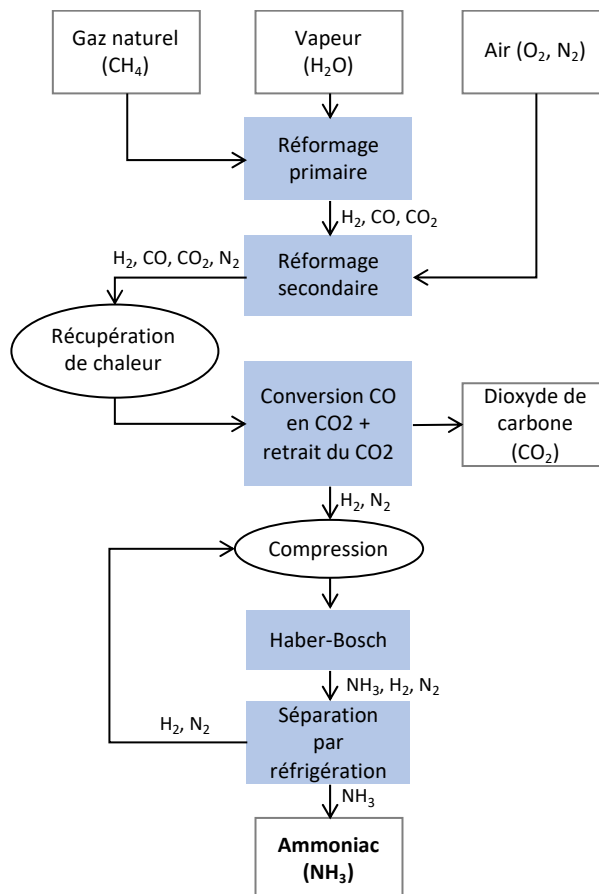


Figure 68 : Procédé simplifié de production d'ammoniac à partir de méthane²⁴

²⁴ Solagro, d'après (CEPS, 2014)



Tableau 75 : Bilan de réaction de production d'ammoniac par vaporeformage de méthane

		Bilan matière	
		molaire ou volumique	massique
Intrant	Méthane	0,44	0,41
	Eau	0,62	0,65
produit	CO2	0,44	1,14
	NH3	1	1

Dans les conditions réelles et à partir de gaz naturel le bilan massique est présenté sur le tableau suivant.

Tableau 76 : Bilan massique de production d'ammoniac par vaporeformage du gaz naturel

Pour produire 1 tNH3			Vaporeformage		Electrolyse
			Actuel	retenu	
Intrant	Gaz naturel	t/tNH3	0,44	0,41	0
		MWh _{PCS} /tNH3	6,5-8,6	7,4	0
	Eau	t/tNH3	0,7	0,7	1,6
Intermédiaire	H2	t/tNH3	0,2	0,2	0,2
produit	CO2	t/tNH3	1,2 - 1,6	1,34	0
	NH3	t/tNH3	1	1	1

En termes de « mobilité », l'ammoniac est un produit actuellement peu transporté à l'échelle mondiale, il est principalement transformé sur place à 88 %²⁵. Il se transporte néanmoins, sous forme liquide (-33°C), par camion, navire ou pipeline. La France présente d'ailleurs la particularité d'importer environs 40-45% de ses besoins (voir Tableau 78).

6.9.2. Situation actuelle

6.9.2.1. Production/import/export/consommation

La France possède 4 sites de production :

Tableau 77 : Liste des sites de production d'ammoniac en France

Société	Lieu	Dpt	capacité (kt/a)
Borealis	Grandpuits	77	439
Borealis	Grand Quevilly	76	400
Yara France	Le Havre	76	400
Borealis	Ottmarsheim	68	260

La production française est de l'ordre de 900-1000 kt/a, pour une consommation nettement supérieure de l'ordre de 1500-1600 kt/a, soit une couverture des besoins de l'ordre de 60 %. Les importations (40 %) se font principalement par navire sur les ports de Bordeaux/Ambès et de Montoir.

²⁵ <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/acc.htm>

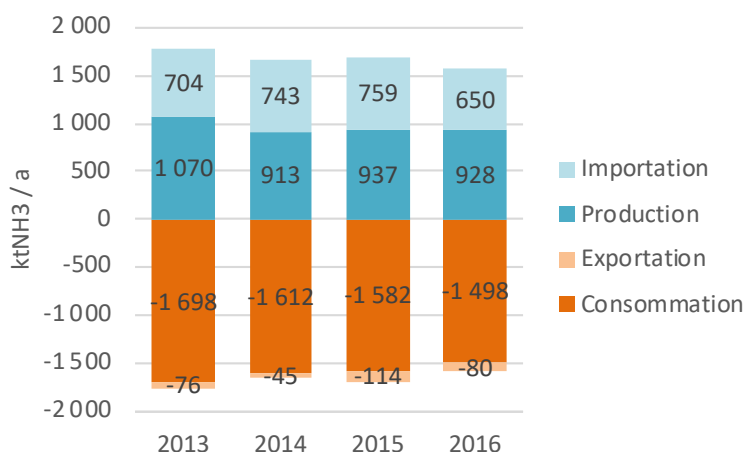


Figure 69 : Bilan production consommation d'ammoniac en France

Tableau 78 : Bilan Ammoniac France

France		2010	2013	2014	2015	2016
Production	kt/a	1 018	1 070	913	937	928
Importation	kt/a		704	743	759	650
Exportation	kt/a		76	45	114	80
Consommation	kt/a		1 698	1 612	1 582	1 498
	ktN/a		1 399	1 327	1 303	1 234

Sources Douanes/Société chimique de France Calculé par bilan ProdCom IFA

6.9.2.2. Demande

A l'échelle mondiale, la consommation d'ammoniac se répartit selon les usages suivants²⁶ :

- 82 % engrais azoté,
- 15 % pour la production de plastiques et fibres (polyuréthane, résines urée-formol, nylon, acrylonitrile, etc.),
- 3 % pour la fabrication d'explosif.

Pour la France il est difficile de tracer les usages. La production d'engrais azoté, principalement sous forme d'ammonitrate, représente le premier usage et probablement la très grande majorité de l'ammoniac consommé en France.

On note néanmoins d'autres usages tels que :

- La production d'ammonitrate technique, sur le site de Maxam, à Mazingarbe, en particulier pour de la production d'explosif.
- La production de produits chimiques tels que l'adBlue (additif deNox pour les véhicules diesel), dans l'usine Yara d'Ambes.

Il reste difficile de rassembler une statistique cohérente sur le flux d'ammoniac pour la production d'engrais. L'UNIFA et ANPEA publient des statistiques sur les engrais (Tableau 79) : sur environ 2 200 ktN/a²⁷ d'utilisation d'engrais azoté en France seul 35 % sont d'origine française, soit environ 770 ktN/a.

Tableau 79 : Statistiques engrais azoté, en équivalent Azote (N), France

UNIFA / ANPEA		2 013	2 014	2 015	2 016
Consommation	ktN/a	2 191	2 208	2 221	2 248
dont produit en France	ktN/a	811	773	733	742
	%	37%	35%	33%	33%

Néanmoins, les engrais ou leurs intermédiaires produits en France peuvent aussi être exportés. Une évaluation de ces quantités est faite sur le

²⁶ <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/acc.htm>

²⁷ Les produits azotés sont fréquemment évalué en eqN, pour l'ammoniac le ration N/NH3 = 0,82



Tableau 80.



Tableau 80 : Bilan d'approvisionnement français 2014 des principaux produits « aval » de l'ammoniac en ktN/a (Source ProdCom)

Produit	Production	Importation	Exportation	Vente	Export pour engrais - hyp min
Acide nitrique	767 962 248	0	0	132 182 512	0
Amonitrate	708 578 640	164 769 590	116 853 698	96 714 334	0
Urée (N<45%)	9 901 492	15 998 239	5 127 411	9 901 492	0
Urée (N>45%)	0	723 731 720	33 191 191	0	0
Sulfate d'ammoniaque	0	156 600 031	8 119 841	0	8 119 841
AN avec carbonate de calcium (N<28%)	353 749 547	253 232 352	153 850 797	0	153 850 797
AN avec carbonate de calcium (N>28%)	445 811 480	36 062 744	4 858 888	410 920 320	4 858 888
Solution N	51 648 769	743 125 509	315 057	51 421 804	315 057
Autres	476 401 230	42 760 530	5 199 762	451 342 670	5 199 762
Total			327 516 645		172 344 345

En 2014, l'évaluation est comprise entre 170 et 330 ktN/a (moyenne retenue de 250 ktN/a). Au total, on estime la production d'engrais azoté en France de l'ordre de 1020 ktN/a en 2014 ce qui représente 77 %²⁸ de la consommation d'ammoniac en France.

Au final, on retient le bilan suivant de l'utilisation de l'ammoniac en France :

Tableau 81 : Bilan de l'utilisation de l'ammoniac en France

Produit/secteur	Part	Détail
Engrais azotés	77%	
Chimie	18%	Production de plastiques et fibres synthétiques (PU, résines urée-formol, nylon, acrylonitrile...)
Explosif	4%	
Environnement	1%	DeNOX (SCR, SNCR) : unité de combustion fixe ou mobile (véhicule terrestre)

Zoom sur les engrais azotés

En Europe et en particulier en France, l'ammonitrate est l'engrais azoté « historique », sur lequel s'est développé l'outil de production. En 1970 (Figure 70), il représentait environ 2/3 des consommations d'engrais azoté en France. Néanmoins depuis la fin des années 1970, la forte augmentation de demande en azote a été absorbée par les solutions azotées (mélange urée/ammonitrate) et l'urée qui est majoritairement importée (voir Figure 70 et Figure 71) : aujourd'hui la part de marché de l'ammonitrate ne représente plus qu'environ 1/3 du marché des engrais azotés français.

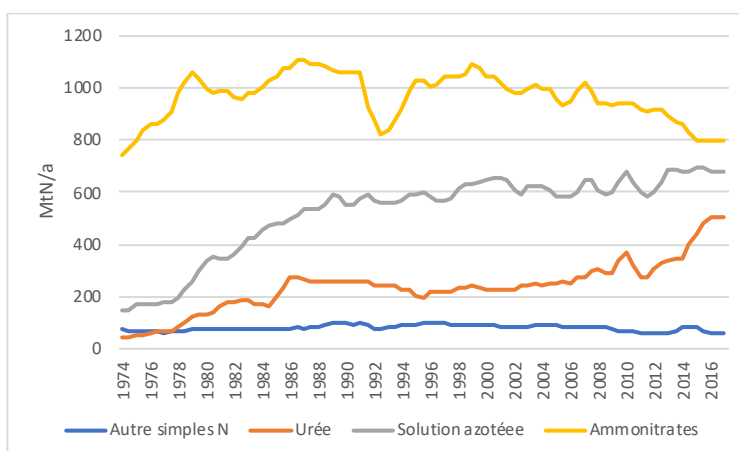


Figure 70 : Consommation d'engrais azoté en France par type de produit (Source : UNIFA)

28 1020 / 1327 = 77 %



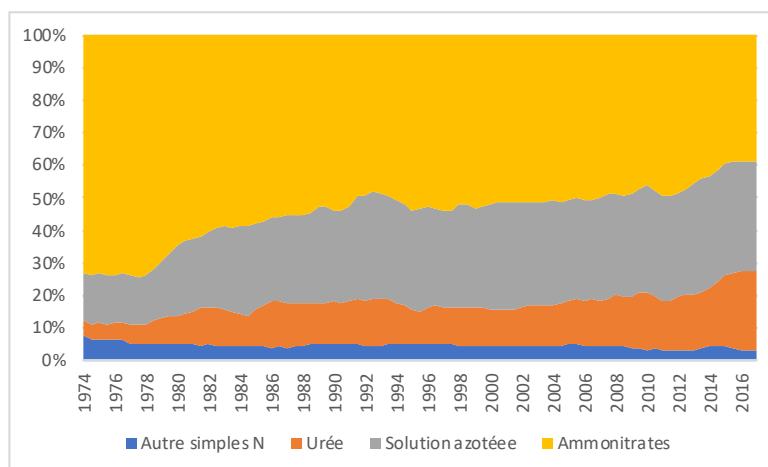


Figure 71 : Part de marché des engrais azoté en France (Source : UNIFA)

La production d'engrais azoté française est ainsi en concurrence forte avec les pays producteurs de gaz naturel qui ont mis en place des capacités de production dédiée à l'export d'ammoniac mais aussi d'urée (ex : Algérie, Egypte, Russie). Les coûts de productions y sont plus faibles principalement en raison du faible coût du gaz naturel (voir Figure 72) mais aussi en raison de procédés de production plus simples : la filière urée ne nécessite pas d'étape intermédiaire comme la production d'acide nitrique pour l'ammonitrate.

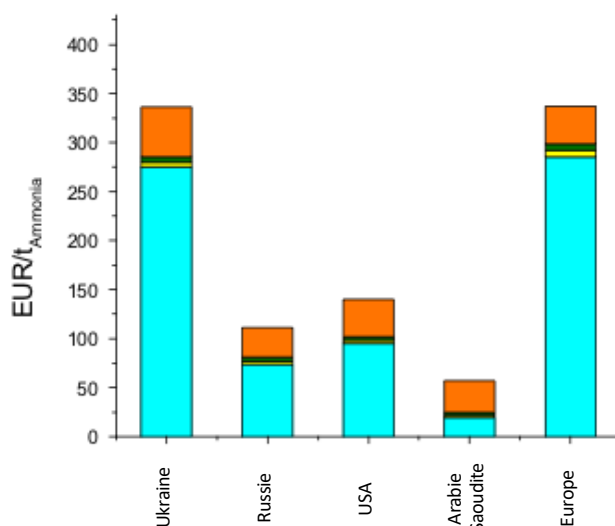


Figure 72 : Évaluation des coûts de production de l'ammoniac selon la région de production (Boulamanti, Aikaterini, & Jose A. Moya, 2017)

6.9.3. Éléments de prospective

6.9.3.1. Production

Demande

Les engrais azotés sont la principale consommation d'ammoniac en France (77 %). Le scénario énergie-climat 2035-2050 de l'ADEME (ADEME, 2017) comporte une modélisation de l'évolution du système agricole qui intègre d'une part une évolution de la demande (en particulier évolution du régime alimentaire), mais aussi une évolution des pratiques agricoles vers plus d'agroécologie. Il en résulte une baisse de consommation d'engrais azoté minéraux de 40 % en 2035 et 50 % en 2050 (sur une base de la consommation 2010).

Cette baisse est liée à une utilisation plus efficace des engrais azotés, mais surtout à la mise en œuvre de pratique d'agroécologie avec notamment :

- un allongement des rotations permettant l'introduction de légumineuses qui fixent l'azote de l'air
- la généralisation des couverts d'intercultures, pouvant comporter des légumineuses, mais permettant surtout de limiter le lessivage des nitrates.

En complément, des engrais organiques principalement issus des digestats de méthanisation de matière organiques se substitueront aux engrais minéraux.

D'autres hypothèses pourraient être retenues qui impacteraient plus ou moins l'outil de production français :

- La baisse de la part ammonitrate dans la consommation d'engrais (prolongement tendance actuelle) induit que le filière de production d'engrais français subit une baisse plus forte (à moins de la réorganiser pour produire de l'urée => investissements lourds).
- L'augmentation de la part ammonitrate dans l'utilisation française des engrais permet de maintenir la production d'engrais français en partie basée sur importation d'ammoniac.

Le Tableau 82 est une première grille de lecture sur les différents déterminants pouvant guider le choix vers l'une ou l'autre des filières.

	Ammonitrate	Urée
Sécurité approvisionnement	+ (filière actuelle française)	-
Pollution de l'air (NH ₃ est un précurseur de particules fines)	+ (moins de sensibilité à la volatisation (Cohan & Le Souder, 2013))	-
Bilan GES	-/+ Bilan à la production défavorable en raison de l'émission de N ₂ O lors de la production d'acide nitrique ²⁹ , néanmoins les industriels ont indiqué avoir réduit sensiblement ces émissions ces dernières années. En partie contrebalancé lors de l'utilisation car les doses en N nécessaires sont généralement plus faibles (moins de volatisation et mieux assimilable) Le passage à la production d'ammoniac à partir d'électrolyse basée sur de l'électricité renouvelable pourrait fortement améliorer le bilan global.	-/+
Sécurité accident/terrorisme	- Matière explosive (ex : explosion AZF)	+
Coût	- (Une étape intermédiaire de production d'acide nitrique est nécessaire)	+ (Production directe) (Capacités de production installée dans pays bas coûts gaz naturel)

Tableau 82 : Comparaison des déterminants pouvant influencer le choix entre l'ammonitrate et l'urée

Les évolutions sur les autres usages sont difficiles à évaluer, les hypothèses suivantes pourraient toutefois être retenues :

- Usage en chimie (représente 18 % de la demande actuelle) : l'ammoniac est utilisé directement ou indirectement (production intermédiaire d'urée) pour la synthèse de certains plastiques, tels que le polyuréthane, les résines urée-formol, le nylon, etc. Dans la modélisation, cet usage est relié à la consommation de plastique.
- Usage explosif (représente 4 % de la demande actuelle) : considéré stable par manque de déterminants.
- Environnement (représente 1 % de la demande actuelle) : l'utilisation de l'ammoniac ou de l'urée comme réducteur de NOx pourrait évoluer à l'avenir :

²⁹ Comparaison du bilan GES des engrais azotés (par unité d'azote de l'engrais : ne prend pas en compte les phase d'épandage, d'assimilation par les plantes...) :

Source	Ammonitrate	Urée
Planete 2002	6,172	
Gaillard, 1997		3,634
Ecoinvent v2, SimaPro 8.0.2, 2003	8,16	3,07
Moyenne	7,16	3,35

Rq : il n'a pas été trouvé de sources récentes prenant en compte l'amélioration des procédés de production de l'acide nitrique, qui doit améliorer le bilan de l'ammonitrate.



- A la hausse :
 - + de combustion de biomasse, augmentation des puissances moyennes,
 - généralisation sur le moteur à combustion de véhicule.
- A la baisse :
 - baisse de la production d'électricité par cycle thermique,
 - baisse des véhicules à moteur thermique.

Une évaluation de ces différents segments d'utilisation et de leur évolution à venir nécessiterait une étude approfondie démesurée au regard de la part de cet usage dans la demande en ammoniac (1 %).

Import / export

La demande à la baisse pourrait être reportée de manière privilégiée sur les imports. Cette hypothèse privilégie la production française ce qui induit que l'on donne de la valeur aux aspects de :

- Sécurité d'approvisionnement.
- Bilan GES (si passage aux gaz renouvelables ou électrolyse).

6.9.3.2. Recyclage

Il n'est pas prévu de recyclage pour l'ammoniac.

6.9.3.3. Procédé

Le paragraphe suivant fait état de potentielles évolutions de procédés pour décarboner le secteur. Ces évolutions sont présentées à titre illustratifs et ne sont pas nécessairement utilisées dans le modèle qui a été développé. Ils feront l'objet, au-delà de cette étude, d'une analyse plus approfondie dans le cadre de développement de Plans de Transition Sectoriels que mènera l'ADEME en concertation avec les acteurs.

L'hydrogène qui entre actuellement dans la composition de l'ammoniac est aujourd'hui issu du vaporeformage de gaz naturel. Le passage à de l'hydrogène produit par de l'électricité renouvelable via l'électrolyse de l'eau permettrait de réduire fortement le bilan GES du procédé. Il permettrait aussi, à condition que le procédé soit flexible, de proposer des services de flexibilité au réseau électrique.

La production d'ammoniac à partir d'hydrogène issu d'électrolyse n'est pas nouveau, il a été utilisé par le passé en Norvège³⁰ et en Afrique³¹ dans de grandes usines alimentées en continu par de l'électricité bas coût issue de barrage hydroélectrique. Il s'agit donc d'un procédé basé sur des technologies matures, mêmes si ces dernières peuvent encore être améliorées (rendement, coûts, flexibilité).

Aujourd'hui, avec la nécessité de réduire les émissions de GES, cette solution est de nouveau mise en avant car au-delà d'éviter le recours à l'énergie fossile comme manière première, elle pourrait également permettre de proposer des services de flexibilité voire de stockage au système électrique³².

Cette solution technologique est décrite sur la Figure 73. Par rapport au procédé conventionnel, seule la partie aval de synthèse de l'ammoniac (Haber-Bosch) est conservée. L'apport de l'azote est plus complexe, il faut séparer en amont l'azote (N₂) de l'oxygène (O₂)³³. La consommation d'hydrogène reste de 178 kg/t_{NH₃}, ce qui représente une consommation d'eau de 1,6 t_{H₂O}/t_{NH₃} soit environ deux fois plus que pour la production à partir de gaz naturel.

Le fait que l'on supprime les rejets de CO₂ réduit les synergies pour l'intégration d'une chaîne de production d'urée sur le même site (flux concentré de CO₂ en sortie) : il faudra se procurer du CO₂ sur une autre source ou alors imaginer des usines mixtes qui associe vaporeformage et électrolyse. Dans tous les cas, ce point n'est pas problématique pour la filière française qui n'a pas mis en œuvre de production d'urée.

³⁰ <http://nelhydrogen.com/about/>

³¹ <http://www.sablechemicals.com/about-us>

³² L'ammoniac pourrait être utilisé comme combustible et permettre d'alimenter des centrales électriques ou des véhicules. Voir par exemple (ISPT, 2017)

³³ Dans le procédé actuel, l'air est directement injecté dans le vaporeformeur du gaz naturel, ce qui permet de convertir l'O₂ en CO et CO₂.

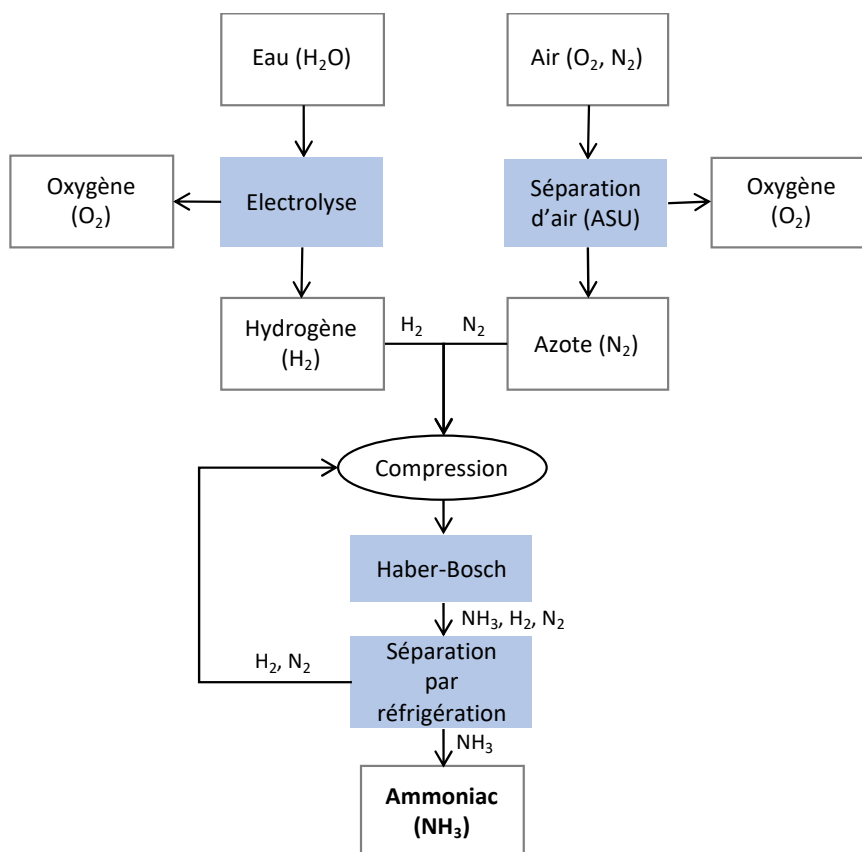


Figure 73 : procédé simplifié de production d'ammoniac à partir de d'hydrogène électrolyté (DECHEMA, 2017)

Avec ce procédé, la consommation d'énergie finale augmente en passant de 9,3 à 12,5 MWh/t_{NH3}, mais permet une forte baisse des émissions de GES (0,2 t_{eqCO2}/t_{NH3} contre 2,0 t_{eqCO2}/t_{NH3} dans le procédé basé sur le gaz naturel) si l'approvisionnement se base sur de l'électricité renouvelable (voir Tableau 83).

Tableau 83 : Comparaison des consommations d'énergies et des émissions GES spécifiques des procédés de production d'ammoniac.

	unité	Vaporeformage	Electrolyse
Consommation d'énergie	MWh/t_{NH3}	9,3	12,5
Gaz naturel (Matière première + combustible)	MWh _{PCS} /t _{NH3}	9,3	0,0
Electricité	MWh/t _{NH3}	0,0	12,5
Emissions CO2	t_{eqCO2}/t_{NH3}	2,02	0,16

Hypothèses de calculs :

- Consommation
 - Vaporeformage issue des meilleures technologies actuellement disponibles
 - Électrolyse : voir (DECHEMA, 2017)
- Émissions, coefficients issus de base Carbone ADEME
 - Gaz Naturel : 0,218 geqCO2/kWhPCS
 - Electricité considéré éolien terrestre : 0,0127 geqCO2/kWhPCS



Les coûts de production de cette filière sont évalués entre 250 et 380 €/t_{NH3} pour un coût de l'électricité de 10 €/MWh et 735 à 800 €/t_{NH3} pour un coût de l'électricité de 50 €/MWh^{34, 35}. Cette solution est donc encore difficilement compétitive avec la filière vaporeformage évaluée à 350 €/t_{NH3} en Europe, et pouvant descendre à 50 €/t_{NH3} pour certain pays producteur de gaz naturel (voir Figure 72).

Deux nouveaux pilotes ont été mis en service cette année avec notamment comme objectif de démontrer les possibilités de flexibilité/stockage :

- Japon, au Fukushima Renewable Energy Institute (FREA), capacité de 20 kg_{NH3}/j
- UK, au Laboratoire de Rutherford Appleton à Oxford, capacité de 30 kg_{NH3}/j, projet porté par SIEMENS.

A plus long terme, on peut imaginer que d'autres procédés pourront arriver à maturité et permettre des gains supplémentaires en termes de coûts et de flexibilité. Il s'agit notamment de la synthèse électrochimique directe de l'ammoniac, dans laquelle l'azote est directement apporté dans l'électrolyseur. Ces travaux sont encore au stade du laboratoire (DECHEMA, 2017) et ne sont pas pris en compte dans l'étude³⁶.

³⁴ Ces évaluations sont faites en considérant un fonctionnement continu toute l'année, les coûts seraient augmentés si le nombre d'heures de fonctionnement diminuaient, pour s'adapter aux heures à tendanciellement excédentaires de production d'électricité renouvelable et donc aux heures de fonctionnement les moins chères. Les données sont issues du rapport (ISPT, 2017)

³⁵ A titre de comparaison, en France, le prix de marché de l'électricité moyen sur l'année 2017 a été de 45 €/MWh. <http://bilan-electrique-2017.rte-france.com/marches/41-prix-de-marche/#>

³⁶ En réalité, que l'on utilise un procédé en deux temps électrolyse + synthèse Haber-Bosch ou une synthèse directe, le bilan matière doit être le même et n'a donc pas d'impact sur la présente étude.

6.10. Les Papier-Cartons

6.10.1. Description du/des procédés

L'industrie papetière se décompose en 2 principales activités : la préparation de pâte, et les machines à papier. Les usines de pâte utilisent comme matière première principalement du bois, au moins en Europe. Les procédés de transformation peuvent être mécaniques ou chimiques (ou les deux). Le choix entre ces deux filières se fait principalement en fonction des matières premières et des caractéristiques du produit final souhaité :

- Pâte mécanique : fibres plus courtes, papier/carton de moins bonne résistance au vieillissement (qualité mécanique), mais rendement matière meilleur.
- Pâte chimique (en particulier le procédé Kraft = 80 % dans le monde) : permet de conserver des fibres plus longues et donc d'avoir une meilleure résistance du papier. Ce procédé permet également de séparer la lignine et l'hémicellulose, qui produisent la liqueur verte puis noire et sert de combustible généralement autoconsommé pour la production de vapeur et d'électricité.

Le papier ou carton de récupération peut aussi être utilisé pour la fabrication de pâte. Le processus est alors simplifié et moins consommateur en énergie (principalement de l'électricité). Il dépend néanmoins de la qualité du papier de récupération (impuretés) et de l'usage final (nécessite un désencrage ou pas). A noter que le recyclage ne peut être infini, et qu'une part de fibre vierge est nécessaire pour assurer les qualités principalement mécaniques au papier.

La ou les pâtes sont ensuite utilisées dans l'usine à papier (machine à papier). La pâte est déposée sur une toile, égouttée puis pressée et séchée à travers une série de rouleau chauffés à la vapeur.

Ces deux principales étapes peuvent être réalisées sur un même site que l'on appelle usine intégrée. Cette intégration présente plusieurs avantages dont :

- Réduction de la consommation énergétique ;
 - Surplus de la chaleur du procédé de fabrication de pâte transféré à la machine à papier (vapeur voire électricité).
 - Il n'est pas nécessaire de sécher la pâte pour le transport.
- Réduction des consommations d'eau et effluents, les eaux récoltées pour le séchage du papier pouvant être utilisé dans le procédé de la pâte.

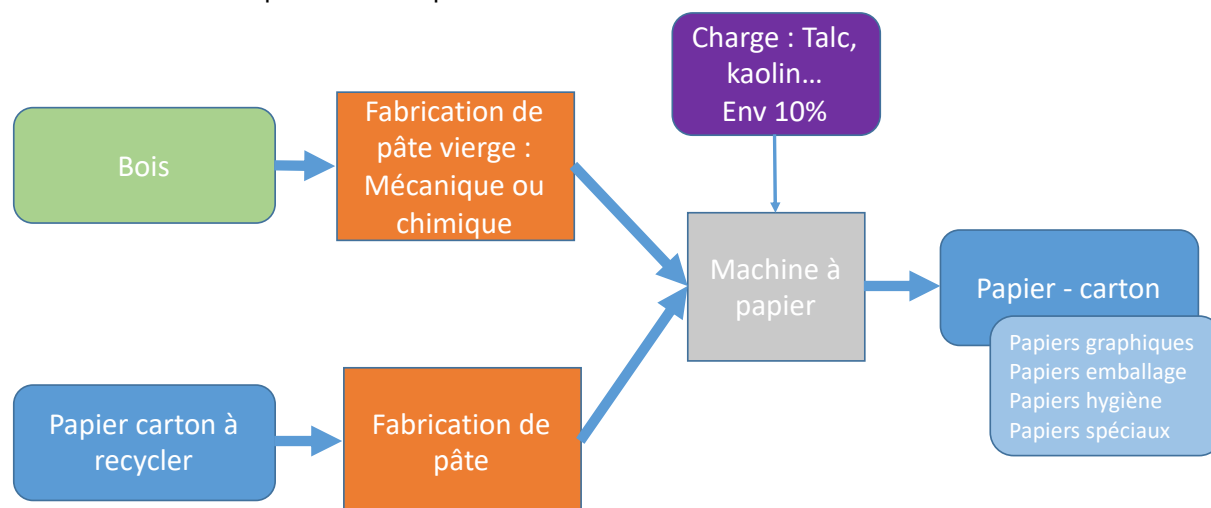


Figure 74 : Procédé papetier

6.10.2. Situation actuelle

6.10.2.1. Production/import/export/consommation

Quelques indicateurs sur le secteur industriel français du papier-carton (source COPACEL) :

- 88 usines en France métropolitaine,
- 136 machines à papier,
- 12 430 employés,
- 13^{ème} pays producteur mondiale (2 % de la production),
- 5^{ème} pays producteur européen (9 % de la production).



Bilan pâte à papier vierge

Le bilan actuel de la pâte à papier vierge est représenté sur le Tableau 84. La production actuelle de pâte vierge se situe aux alentours de 1 700 kt et représente environ 60 % de la consommation. La France importe environ 2000 kt de pâte vierge principalement depuis l'Europe (environ 50 %) et l'Amérique latine (environ 40 %).

Tableau 84 : Bilan actuel de pâte à papier vierge (Source : COPACEL)

Pâtes vierge		2006	2014	2015	2016
Production	kt/a	2 470	1 660	1 730	1 720
Importation	kt/a	1 850	1 740	1 690	1 660
Exportation	kt/a	390	450	490	470
Consommation	kt/a	3 930	2 950	2 930	2 910
P/C		0,63	0,56	0,59	0,59

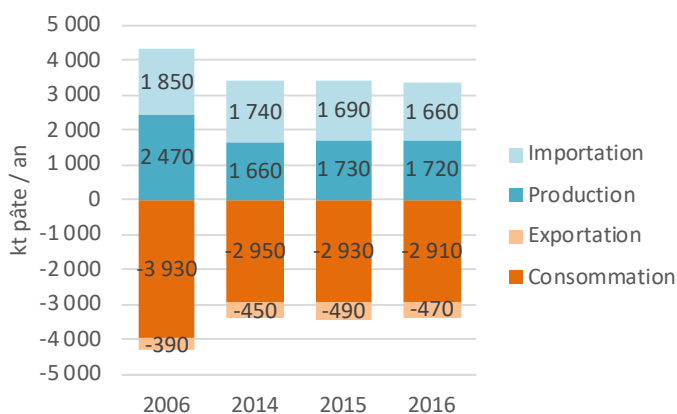


Figure 75 : Bilan actuel de pâte à papier vierge (Source : COPACEL)

Pour la partie de pâte vierge produite en France, le bilan d'approvisionnement en bois est décrit sur le Tableau 85 et la Figure 76. La production de bois actuelle de 6 600 kt/a couvre environ 96 % du besoin (7 000 kt/a). On observe néanmoins une baisse tant de la production que de la consommation de bois pour la papeterie, environ -25 % depuis 2006. Le ratio moyen bois/pâte est de l'ordre de 4.

Tableau 85 : Bilan d'approvisionnement du bois pour la papeterie (Source : COPACEL)

Bois pour pâte		2006	2014	2015	2016
Production	kt/a	8 370	6 642	6 592	6 566
Importation	kt/a	689	473	443	397
Exportation	kt/a	0	0	0	0
Consommation	kt/a	9 059	7 115	7 035	6 963
P/C		0,92	0,93	0,94	0,94

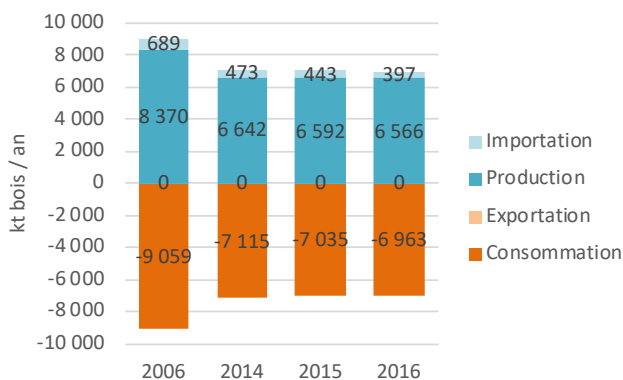


Figure 76 : Bilan d'approvisionnement du bois pour la papeterie (Source : COPACEL)

Bilan pâte recyclée

Le bilan de la pâte recyclée est présenté sur le Tableau 86. Sur une récupération d'environ 7 200 kt de papier à recycler, la France en consomme environ 5 350 kt. Elle produit donc un excédent de 35 % par rapport à ses besoins.

Tableau 86 : Bilan de pâte à papier recyclée (Source : COPACEL)

Papier carton à recycler		2006	2014	2015	2016
Production (récupération)	kt/a	6 999	7 316	7 145	7 234
Importation	kt/a	1 037	945	1 017	978
Exportation	kt/a	1 986	2 861	2 869	2 858
Consommation	kt/a	6 050	5 400	5 293	5 354

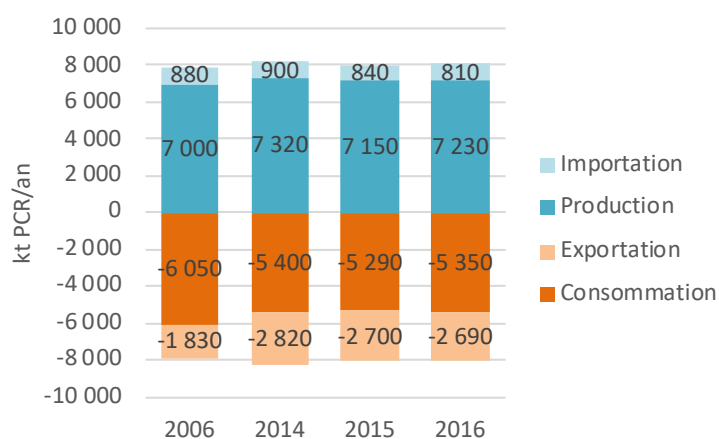


Figure 76 : Bilan de pâte à papier recyclée (Source : COPACEL)

Les taux de récupération varient de manière importante entre les types d'usage du papier : ils sont particulièrement élevés pour les emballages (plus de 100 %) mais nul pour les papiers d'hygiène (non collectés pour des questions d'hygiène). L'effet est moins important pour les taux d'incorporation de MPR à la production. Les taux sont inférieurs à la moyenne pour les papiers graphiques où les qualités visuelles (blancheur) peuvent être importantes³⁷. Les papiers d'hygiène, pour des raisons de propreté utilisent que des sortes de papier graphique de bonne qualité. Seul pour les papiers d'emballage, le taux d'incorporation de MPR à la production est particulièrement élevé.

Tableau 87 : Bilan du recyclage selon le type de papier (Source : COPACEL)

2014	Consommation	Taux de récupération	Collecte	Utilisation	Taux d'incorporation de MPR à la production	Production papier
	kt/a	%	kt/a	kt/a	%	kt/a
Graphique	3 490	78%	2 722	1 141	44%	2 590
Emballage	4 430	102%	4 505	3 874	91%	4 270
Hygiène	870	0%	0	299	36%	820
spéciaux	190	49%	93	86	20%	420
Total	8 980	82%	7 320	5 400	67%	8 100

NB : Taux de récupération = collecte de papier à recycler / consommation³⁸ Taux d'incorporation de MPR à la production = Papier à recyclé utilisé / production de papier

³⁷ Dans ce secteur l'utilisation de papier recyclé même pour du papier graphique blanc de qualité n'est pas impossible mais nécessite des traitements coûteux et des pertes matières plus importantes ce qui dégrade la compétitivité de la pâte à papier recyclé.

³⁸ La consommation de papier prise en compte correspond à la consommation finale de papier mais à celle sortie de machine à papier. Il y a entre les deux les transformateurs (ex : fabrication de livre, articles de papeteries, emballages, etc.). De même, la consommation de papier ne correspond pas à la quantité de papier « jeté » la différence entre les deux dépend des durées d'utilisation (exemple archivage), mais aussi des flux de papiers durant leur utilisation (ex : emballage). Ce dernier point explique



Bilan papier

Le bilan du papier est présenté sur le Tableau 88. La France produit environ 7 600 kt de papier par an, mais en consomme 8 700 kt, elle satisfait donc environ 87 % de ses besoins.

Tableau 88 : Bilan actuel du papier

Total Papier		2006	2014	2015	2016
Production	kt/a	9 506	8 095	7 985	7 984
Importation	kt/a	6 290	5 112	5 026	4 874
Exportation	kt/a	4 964	4 228	4 118	4 049
Consommation	kt/a	10 832	8 979	8 893	8 809
Prod/Conso	%	88%	90%	90%	91%

6.10.3. Demande

On peut découper la demande de papier selon 4 grandes catégories :

- Papiers graphiques : papiers journaux, livre, bureautique, etc.
- Papiers emballages : papiers pour la fabrication de carton ondulé, papier d'emballage souple et les cartons.
- Papiers Hygiène : papier toilette, essuie-tout, mouchoir, couches, etc.
- Papiers spéciaux : billets de banque, application industrielle, filtres, etc.

Aujourd'hui, les papier « emballage » représentent 50 % de la demande française, suivi par les papiers graphiques (35-40 %) puis les papiers d'hygiène (10 %). Les papiers spéciaux sont marginaux (1 à 2 %). Historiquement, le papier graphique représentait la plus forte demande (50 % en 2006), mais cet usage a fortement chuté (-40 %) principalement en raison du phénomène de dématérialisation.

par exemple le fait que le taux de récupération pour le papier carton d'emballage excède les 100%, étant donné que la France est importatrice nette sur les produits manufacturés : les emballages ont donc une certaine tendance à être produits dans les pays exportateurs de produits manufacturés et collectés en fin de vie dans les pays importateurs.

Tableau 89 : Consommation française de papier, part type de papier (Source : COPACEL)

		2006	2014	2015	2016
Graphique	kt/a	5 310	3 490	3 290	3 230
Emballage	kt/a	4 780	4 430	4 560	4 530
Hygiène	kt/a	750	870	920	910
Spéciaux	kt/a	60	190	130	140
Total	kt/a	10 900	8 980	8 900	8 810
Graphique	%	49%	39%	37%	37%
Emballage	%	44%	49%	51%	51%
Hygiène	%	7%	10%	10%	10%
Spéciaux	%	1%	2%	1%	2%
Total	%	100%	100%	100%	100%

Usages graphiques

Les usages graphiques représentent une production actuelle de 2 300 kt pour une consommation de 3 300 kt, soit une couverture du besoin de 70 %. La production et la consommation sont en baisse (-40 à -50 % depuis 2006) principalement lié à la dématérialisation, le détail par usage est présenté dans le Tableau 91.

Tableau 90 : Bilan papiers graphiques (Source : COPACEL)

Usages Graphiques (UG)		2006	2014	2015	2016
Production	kt/a	4 300	2 586	2 347	2 258
Importation	kt/a	3 966	2 801	2 644	2 595
Exportation	kt/a	2 960	1 899	1 701	1 620
Consommation	kt/a	5 306	3 488	3 290	3 233
Prod/conso	%	81%	74%	71%	70%

Il est néanmoins intéressant de noter que tous les usages du papier graphiques sont en forte baisse, hormis les imprimés publicitaires distribués en boîte aux lettres, avec une hausse de 15 % depuis 2004. Ce secteur représente par ailleurs, et de loin, le premier usage du papier graphique avec un quart de part de marché.

Tableau 91 : Répartition par usage du papier graphique en France (ADEME & SEREHO, Actualisation 2016 des flux de produits graphiques en France, 2017)

	2015	2016	2016%	tendance
Presse payante sur papier journal	327 800	316 000	9%	-50% depuis 2004
Presse gratuite d'information	20 400	20 600	1%	
Presse gratuite d'annonces	10 100	10 200	0%	
Presse magazine	461 400	441 100	13%	-45% depuis 2004
Presse des collectivités locales	40 700	33 000	1%	
Magazine de marques	21 500	19 600	1%	
Edition d'entreprise	18 500	17 600	1%	
Imprimés publicitaires distribués en BAL	861 000	891 000	26%	+15% depuis 2004
Mailings, asiles colis, hors enveloppes	209 100	199 700	6%	
Courriers de gestion	89 800	85 500	2%	-35% depuis 2004
Catalogues VPC - VAD, brochures et doc. commercial	313 800	289 000	8%	
Enveloppes	86 300	80 700	2%	-35% depuis 2004
Annuaire	14 500	9 900	0%	-85% depuis 2004
Livres	227 500	228 200	7%	stable depuis 2004, avec fluctuation +/- 7%
Papier bureautique (ramettes)	517 000	488 600	14%	-25% depuis 2004
Imprimés administratifs et commerciaux, formulaires	211 900	204 500	6%	-15% depuis 2004
Articles de papeterie façonnés	155 500	152 400	4%	-20% depuis 2004
Sous total produits graphiques Autres produits	3 586 800	3 487 600	100%	



Papier et carton d'emballage

Pour la production de papier d'emballage, la production de 4 400 kt couvre quasiment la demande de 4 500 kt, même si l'on observe de fortes importations et exportations de l'ordre de 1 900 kt chacune et qui se compensent. La production et consommation sont assez stables.

Tableau 92 : Bilan papiers emballage (Source : COPACEL)

Emballage et conditionnement (EC)		2006	2014	2015	2016
Production	kt/a	4 469	4 266	4 382	4 439
Importation	kt/a	2 027	1 965	2 001	1 923
Exportation	kt/a	1 721	1 801	1 827	1 832
Consommation	kt/a	4 775	4 430	4 556	4 530
Prod/conso	%	94%	96%	96%	98%

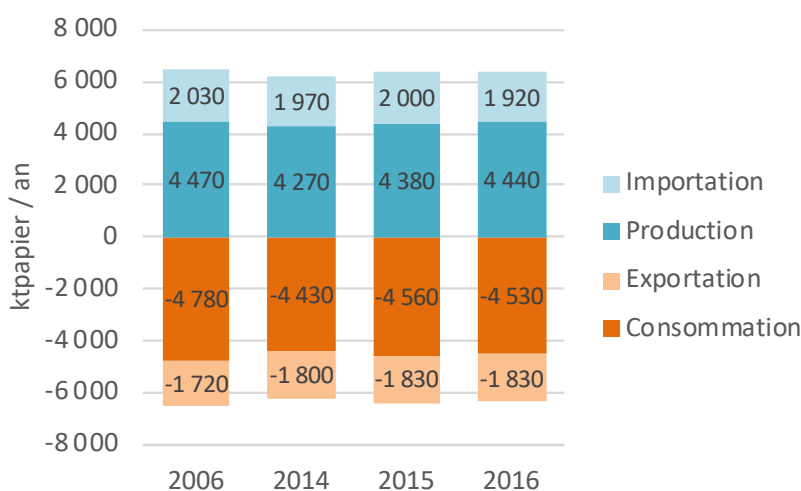


Figure 77 : Bilan papiers emballage (Source : COPACEL)

Le papier d'emballage se décompose en 3 grandes catégories :

- Le papier pour l'ondulé largement majoritaire, il sert de matière première pour produire le carton ondulé utilisé dans l'emballage.
- Le papier emballage souple : il permet principalement de fabriquer des sacs (ex : vrac alimentaire).
- Cartons : utilisé directement pour la confection d'emballage rigides.

Tous ces usages sont relativement stables.

Tableau 93 : Consommation française des différents types de papiers d'emballage

Consommation		2006	2014	2015	2016
Papiers pour ondulé	kt/a	3 368	3 170	3 278	3 258
Papiers d'emballage souple	kt/a	383	318	305	306
Cartons	kt/a	1 024	942	973	966
Total	kt/a	4 775	4 430	4 556	4 530

Papier à usage Hygiène

Le volume de papier d'hygiène est plus restreint avec une production de l'ordre de 850 kt et une consommation légèrement supérieure à 900 kt. La production et la consommation sont en augmentation (+15 à 20 % depuis 2006). Les papiers d'hygiène sont généralement de type absorbant et donc fortement aérés ce qui induit une faible densité apparente et donc un coût à la tonne de transport élevé : le papier d'hygiène est donc relativement peu exposé aux délocalisations. C'est d'ailleurs le seul secteur où l'on observe la construction de nouvelles machines à papier actuellement en France.

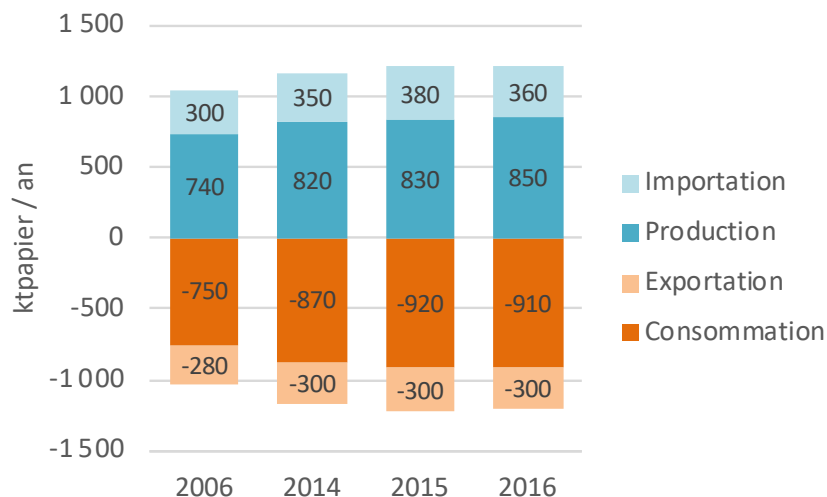


Figure 78 : Bilan papiers hygiène (Source : COPACEL)

Tableau 94 : Bilan papiers hygiène (Source : COPACEL)

Papier d'hygiène		2006	2014	2015	2016
Production	kt/a	737	820	833	846
Importation	kt/a	297	346	381	356
Exportation	kt/a	283	297	299	296
Consommation	kt/a	751	869	915	906
Prod/conso	%	98%	94%	91%	93%

Papiers spéciaux

Les papiers spéciaux sont encore plus marginaux avec une production estimée à 440 kt, largement excédentaire vis-à-vis de la demande nationale de l'ordre de 140 kt.

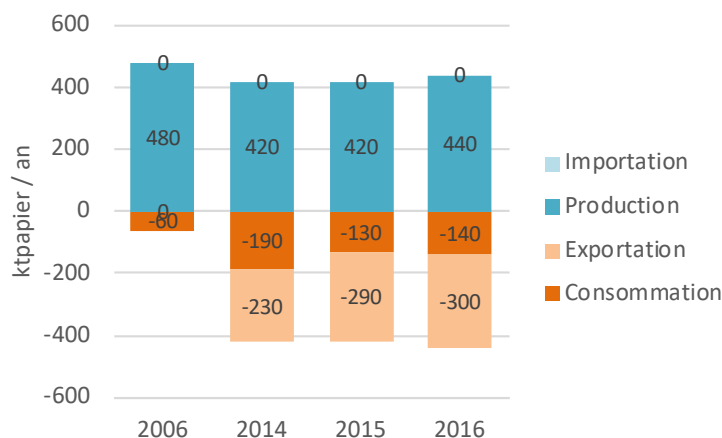


Figure 79 : Bilan papiers spéciaux (Source : Solagro d'après COPACEL)



Tableau 95 : Bilan papiers spéciaux (Source : Solagro d'après COPACEL)

papiers spéciaux		2006	2014	2015	2016
Production	kt/a	483	423	423	441
Importation	kt/a				
Exportation	kt/a		231	291	301
Consommation	kt/a	62	192	132	140
Prod/conso	%	784%	221%	321%	315%

Demande totale

Le bilan total sur le papier « tous usages » montre une production et une consommation relativement stable de l'ordre de 4 400 kt/a en production et 4 500 kt/a en consommation.

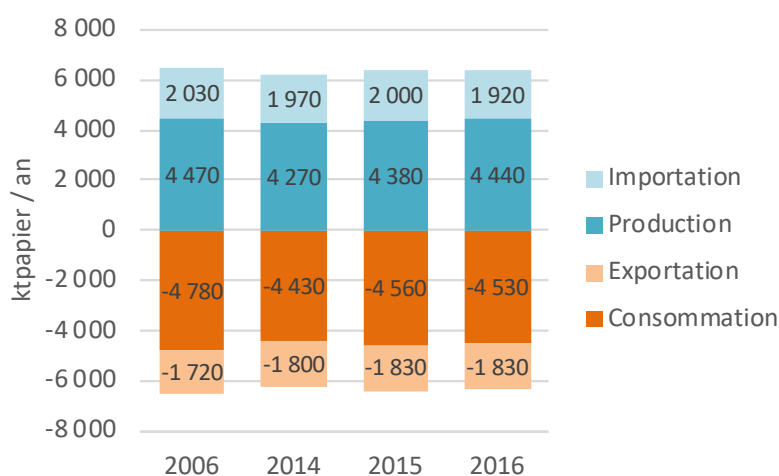


Figure 80 : Bilan papier tous usages (Source : COPACEL)

6.10.4. Prospective pour le papier

6.10.4.1. Production

Demande

L'évolution de la demande est décomposée en deux facteurs : l'évolution de la population (+11.9 % d'ici à 2050) et l'évolution de l'usage.

$$\frac{Demande_{2050}}{Demande_{actuelle}} = (1 + evol_{population}) \times (1 + evol_{usage})$$

Les facteurs d'évolution par usage ($evol_{usage}$) sont décrits dans les paragraphes suivants.

Papiers à usage graphique

Pour les papiers à usage graphique, hormis les publicités dans les boîtes aux lettres, la demande est en forte baisse, il est considéré que cette tendance a de fortes probabilités de se poursuivre dans les années à venir. Pour les publicités dans les boîtes aux lettres, qui représentent 25 % des usages actuels, une baisse forte d'ici à 2050 est envisageable. On peut imaginer que sur le long terme même cette catégorie d'usage sera rattrapée par le phénomène de dématérialisation.

Papiers à usage emballage

Différents effets pourraient induire des hausses ou des baisses des usages sans qu'une tendance n'ait été identifiée.

Papier hygiène

Cette étude n'a pas permis de formuler des hypothèses sur ce point.

Papiers spéciaux

Les produits spéciaux présentent une grande diversité et une faible part de la demande en papier. Il est à la fois difficile de connaître les volumes utilisés dans les différents usages mais aussi les potentielles évolutions. Dans tous les cas, étant donné la faible part que représente ce type de papier dans la demande globale, les choix sur cette catégorie de papier ne sont pas déterminant pour évaluer la demande globale de papier.

Import / export

Cas de la pâte vierge

Pour la pâte à papier vierge, il est observé une tendance lourde à une forte importation en raison de l'accès à des ressources à bas coûts dans certains pays (Europe du nord, Brésil, Canada). Ces coûts faibles étant autant dus à des effets d'échelle sur les usines de production (récentes usines de capacité 1 à 2 Mt/a) que d'accès à des ressources forestières à faibles coûts.

Néanmoins, un scénario de relocalisation partielle peut être envisagé en considérant que :

- L'augmentation des usages en bois d'œuvre produira en France une augmentation du bois énergie (BE) et bois d'industrie (BI) qui en sont les co-produits. Les compétitions que l'on peut observer entre BE et BI récemment pourraient être régulées plus facilement dans le cadre d'une perspective d'augmentation de la ressource, en réservant des approvisionnements longs termes.
- La production de pâte vierge pourrait également permettre de fournir d'autres produits biosourcés, en particulier lors de production de pâtes chimique sur la fraction lignine qui est séparée de la cellulose (voir partie procédé 6.10.4.3). Le contrôle national de cette production serait un atout pour les filières de matériaux biosourcés françaises.

6.10.4.2. Recyclage

La qualité de tri limite le taux d'incorporation de MPR dans la production de papier.

Les taux réels doivent ainsi tenir compte plusieurs contraintes :

- Le potentiel global de ressources PCR.
- L'adéquation entre les sortes de papier récupérés et les besoins spécifiques à chaque type de papier, tant en termes de tonnage, de qualité, de sécurité sanitaire, que de prix d'achat de la matière à recycler.

On considère ainsi que les papiers à usage graphique et hygiène nécessitent des sortes de qualités spécifiques et que le papier d'emballage est plus flexible³⁹.

Les contraintes suivantes pourraient être retenues :

- PCR pour papier hygiène : minimum 80% de sortes supérieures (actuellement 85 %)
- PCR pour papier graphique :
 - minimum 20 % de sortes supérieures (actuellement 25 %),
 - et minimum 90 % pour total sortes supérieures + sortes à désencrer (actuellement 98 %).

Les hypothèses se basent sur les observations actuelles.

Le taux de collecte pourrait être évalué à la hausse, en considérant une amélioration du tri. A noter que le taux de collecte supérieur à 100 % pour les emballages pourrait être revu à la baisse en fonction de la relocalisation de production de biens manufacturés.

6.10.4.3. Procédé

Le paragraphe suivant fait état de potentielles évolutions de procédés pour décarboner le secteur. Ces évolutions sont présentées à titre illustratifs et ne sont pas nécessairement utilisées dans le modèle qui a été développé. Ils

³⁹ Étant donné le faible volume associé au papier spéciaux, et par soucis de simplicité, l'adéquation des sortes n'est pas vérifiée.



feront l'objet, au-delà de cette étude, d'une analyse plus approfondie dans le cadre de développement de Plans de Transition Sectoriels que mènera l'ADEME en concertation avec les acteurs.

Il n'est pas retenu dans la modélisation d'évolution du procédé qui remettent en causes les bilans matières, hormis les évolutions sur les taux d'incorporation de MPR à la production.

A l'avenir, les papeteries pourraient également diversifier leurs produits en allant sur des marchés autre que le papier et carton.

L'usine de Rayonier à Tartas ne produit plus de papier, mais uniquement des produits de celluloses à haute pureté qui entre dans une très grande diversité de produits finaux⁴⁰ :

- Acétate utilisé dans les plastiques, les films, les textiles et les filtres.
- Éthers de grande qualité utilisés dans les peintures, les revêtements industriels, les aliments et les produits pharmaceutiques.
- Produits de spécialités de grande qualité utilisés dans les pneus, les produits alimentaires et les filtres d'automobile.
- Pâte fluff utilisée dans les couches de bébés et autres produits d'hygiène personnelle, les tapis de propreté pour animaux, et les coussinets absorbants de qualité alimentaire.

Sans aller vers une conversion totale du papier vers d'autres produits, des solutions mixtes sont également possibles, en gardant la cellulose pour la production de papier et en valorisant les molécules issues de la lignine, qui, dans le cas des pâtes chimiques ne se retrouve pas dans le papier.

Actuellement la lignine est principalement valorisée énergétiquement sur les sites papetier (liqueur noire). Dans un avenir plus ou moins long terme, dans un objectif de transition vers les bioressources, la lignine pourrait permettre de produire différentes molécules à la base de différents matériaux ou produits chimiques (Tableau 96). Certaines usines dans le monde valorisent déjà les lignosulfonates dans différents secteurs industriels (Valbiom, 2015) tels que la chimie, le ciment, etc.

Tableau 96 : Principales applications de la lignine à différents horizons de temps (Valbiom, 2015)

	Catégories	Exemples
Court terme/faible valeur ajoutée	Bioénergie, gaz de synthèse	Chaleur, électricité
Moyen terme/moyenne à haute valeur ajoutée	Macromolécules	Fibres de carbone Modificateurs de polymère Résines/colles/liants
Long terme ou haute valeur ajoutée	Monomères et oligomères aromatiques	Benzène, toluène, xylène Vanilline Molécules de lignine monomères Molécules plateformes (phénoliques, styrène)

Certaines usines à pâte valorisent déjà des sulfonates.

⁴⁰ <http://rayonieram.com/fr/fibre-haute-performance/produits/>

6.11. Le sucre

6.11.1. Description du procédé

La présente étude se limite au périmètre de la France métropolitaine, ainsi la filière de production de sucre se restreint uniquement à la production de sucre à partir de **betterave sucrière**.

Une fois récoltées, les betteraves sont transportées à l'usine où elles sont lavées, puis découpées en fines lanières appelées cossettes. Celles-ci entrent dans le procédé de diffusion dans lequel une circulation d'eau chaude permet de récupérer les sucres solubles. En sortie, les cossettes épuisées forment de la pulpe avec typiquement 8-10 %MS. Un pressage permet de récupérer une partie de l'eau qui est envoyée avec le jus de diffusion pour le raffinage, laissant une pulpe surpressée à environ 20-30 % de MS. La pulpe peut encore être déshydratée selon les besoins de valorisation pour atteindre 80-90 % de MS.

Les jus issus de la diffusion sont épurés avec un traitement à la chaux puis au CO₂, le tout est ensuite filtré pour récupérer les résidus. Le jus filtré (environ 15 % sucre) est ensuite envoyé dans une série de chaudière pour faire évaporer l'eau et obtenir ainsi un sirop concentré en sucre. Ce sirop peut ensuite être cuit pour cristalliser le sucre le résidu de sucre non cristallisé forme la mélasse (contient environ 60 % de saccharose).

Les productions d'alcool peuvent se faire à partir des jus sucrés de différentes qualités mais aussi de la mélasse.

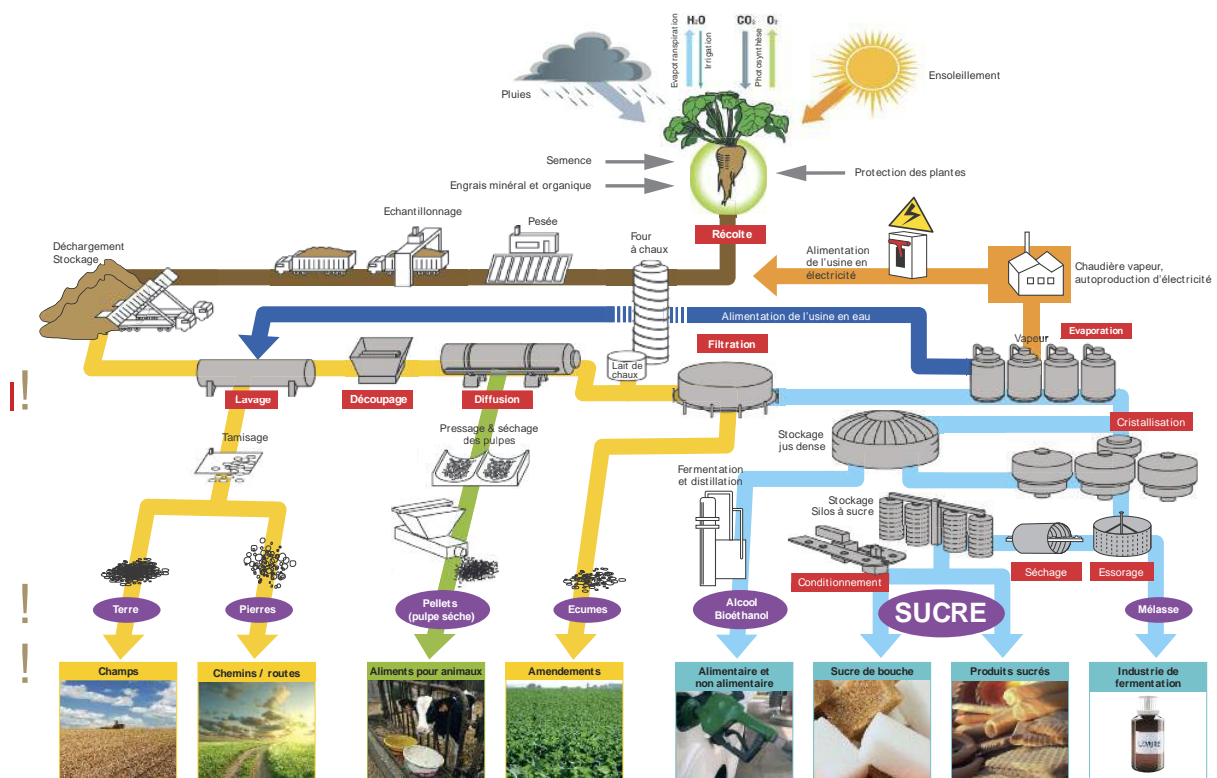


Figure 81 : Procédé sucrier à partir de betterave (Source : SNFS)



6.11.2. Situation actuelle

6.11.2.1. Production/import/export/consommation

La France compte aujourd'hui 25 usines en Franc métropolitaine installées dans la moitié nord de la France à proximité des productions de betterave (Figure 82).

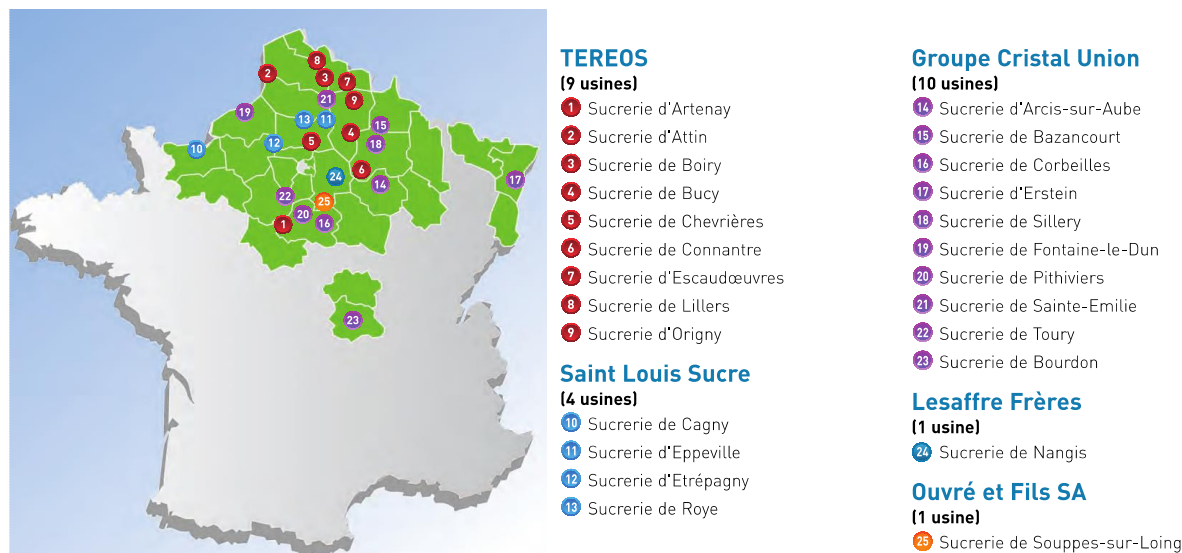


Figure 82 : Localisation des usines (Source : CEDUS)

La France métropolitaine représente 3 % de la production mondiale de sucre, et 25 % de la production à partir de betterave (1^{ère} place sur ce segment). Au niveau européen, la France est le premier producteur, avec 30 % de la production.

La situation française de production de sucre a récemment changé avec la fin du régime des quotas (1967-2017) dans le cadre de la politique agricole commune. Au sein des quotas (13,5 Mt pour l'Europe), ce régime garantissait un prix plancher aux producteurs de sucre européens (les prix d'intervention étaient de l'ordre de 400 €/t, soit 2 à 3 fois le prix sur le marché mondial). Un prix d'achat des betteraves aux agriculteurs était aussi répercuté aux agriculteurs. Par ailleurs, des droits de douane élevés protégeaient le marché européen hormis pour quelques pays couverts par des accords spécifiques (env 3-4 Mt/a). La contrepartie du régime des quotas était la limitation de la production hors quota encadrée par l'OMC, mais permettant jusqu'à environ 1,5 Mt/a d'export.

Au sein de ce cadre historique, la France métropolitaine produisait de l'ordre de 4,5 à 5 Mt/a de sucre⁴¹ pour une consommation nationale de l'ordre de 2,6 à 3,1 Mt/a (Tableau 97). Les importations étaient très limitées (0,3 Mt/a) et les exportations importantes à environ 2 Mt/a. La France est donc largement excédentaire, avec un ratio P/C de plus de 1,5.

Depuis la sortie des quotas, il n'y a plus de prix plancher garanti, mais les droits de douanes élevés sont maintenus à la frontière européenne (420 €/t), hormis les quelques accords historiques avec certains pays. La fin des quotas signifie également la fin des limitations d'exportation. Les producteurs français ont donc cherché à augmenter la production pour exporter. En 2018 la production est montée à plus de 6 Mt/a et les exports à 3,3 Mt/a. Cette augmentation de production est rendue possible par une augmentation des surfaces plantées de betterave d'une part et un allongement des campagnes de production des sucreries d'autre part.

La période de production de sucre est ainsi passée de 3 à 4 mois, cet allongement permet d'augmenter la production avec le même nombre d'usine, ce levier a sans doute atteint sa limite car allonger la période de production nécessite de stocker plus longtemps une partie de la production de betterave dont la quantité de sucre diminue avec le gel.

⁴¹ On parle de sucre extrait, pas de production finale : une partie du sucre sert à la production d'alcool, de mélasse...

Tableau 97 : Bilan sucre (Source : CEDUS)

		2013	2014	2015	2016	2017
		2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018
betterave (eq16°sucre)	kt/a	33 400	37 600	33 600	34 500	46 300
sucre eq 16°	kt/a	5 344	6 016	5 376	5 520	7 408
Sucre extrait						
Production	kt/a	4 531	5 115	4 515	4 681	6 096
Importation	kt/a	350	330	360	330	290
Exportation	kt/a	2 255	2 300	1 900	2 000	3 350
Consommation	kt/a	2 626	3 145	2 975	3 011	3 036
P/C	-	1,7	1,6	1,5	1,6	2,0

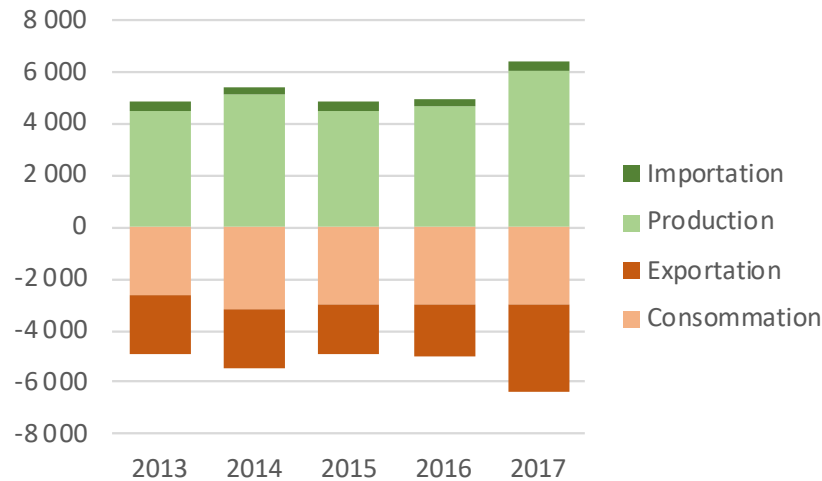


Figure 83 : Bilan sucre (Source : CEDUS)

6.11.2.2. Demande

Le sucre est principalement utilisé pour des usages alimentaires (plus de 70 %). Il est ensuite utilisé pour de la production d'alcool, en différenciant l'alcool industriel (env. 12 %) et le bioéthanol-carburant (env. 11 %). Reste enfin un usage dans la chimie d'environ 6 %.

		2014	2015	2016
Sucre alimentaire	%	70%	71%	74%
Alcool industriel	%	13%	12%	10%
Alcool carburant (Bioethanol)	%	12%	11%	9%
Industrie chimique	%	5%	6%	7%

Tableau 98 : Répartition de la consommation de sucre en France par usage (Source : CEDUS)

6.11.3. Eléments de prospective

6.11.3.1. Évolution de la production

Évolution de la demande

Sucre alimentaire

Le scénario énergie-climat 2035-2050 de l'ADEME (ADEME, 2017) intègre une modélisation de l'évolution du système agricole qui intègre une évolution de la demande, et en particulier une évolution du régime alimentaire : celle-ci prévoit une baisse de 11 % de la consommation de sucre dans l'assiette moyenne des français.

Éthanol carburant

Dans son scénario, l'ADEME prévoit 0,38 Mtep d'éthanol issu de betterave en 2035 et 0,15 Mtep en 2050⁴². Pour comparaison en 2014, la production d'éthanol carburant à partir de betterave était de 0,14 Mtep (CEDUS).

⁴² Soit 4,1 TWh en 2035 et 1,7 TWh en 2050. En masse d'alcool, 884 kt en 2035 et 368 kt en 2050



Alcool industriel et industrie chimique

Peu de données existent sur les détails d'utilisation de l'alcool industriel et le sucre dans l'industrie chimique, encore moins sur les perspectives d'évolution. La demande pour l'alcool industriel et la consommation de sucre dans l'industrie chimique aujourd'hui à 18 % de la demande total en sucre.

Évolution Import / export

Le scénario ADEME prévoit des volumes d'imports et d'export stables (au moins pour 2035, pas précisé pour 2050). La récente fin des quotas et l'augmentation importante de la production tirée par les exports ne semble pas forcément durable sur le long terme, en particulier en raison de la concurrence bas coût de la canne à sucre. On retient donc un volume d'importation stable, et des exportations qui s'ajustent en fonction de la demande nationale d'une part et de la production que l'on considère stabilisé au niveau d'avant la fin des quotas pour 2035.

6.11.3.2. Évolution du procédé

Il n'y a pas d'évolution de procédé pris en compte sur les rendements matières. Seule une adaptation entre la filière production d'alcool ou de sucre en fonction de l'évolution de la demande est intégrée.

La modélisation simplifiée retenue pour la projection se base sur le schéma présenté sur la Figure 84.

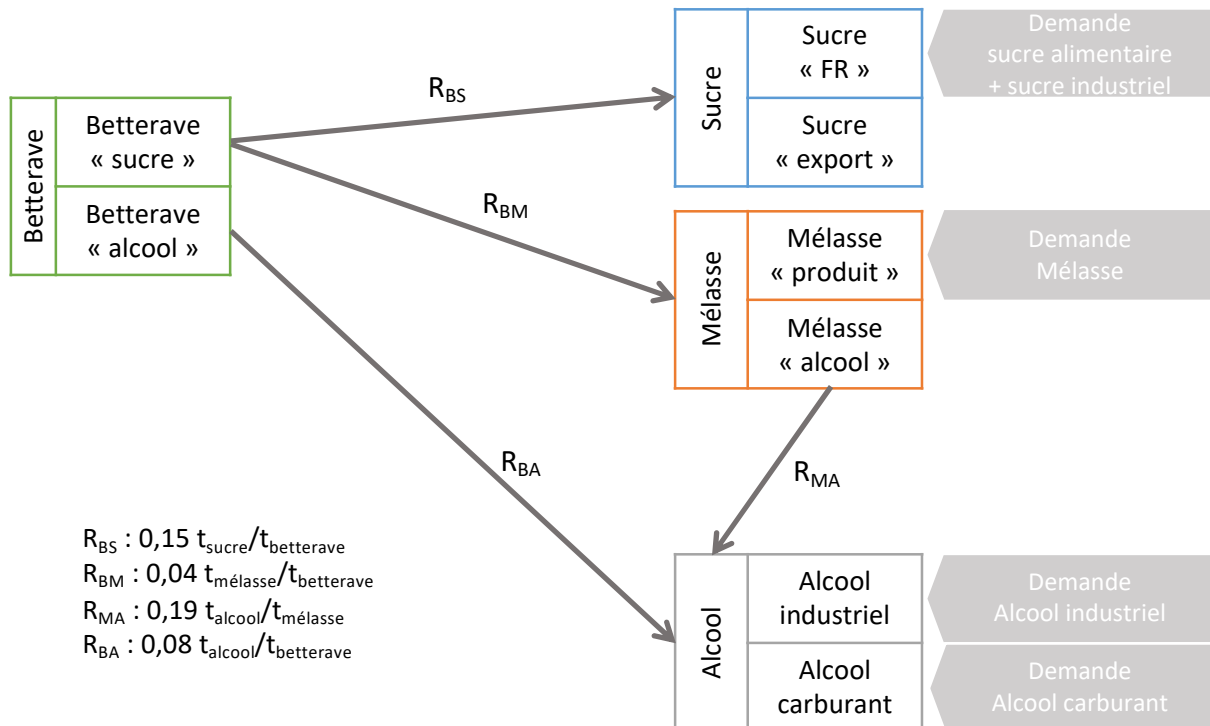


Figure 84 : Principe de modélisation

7. Liste des paramètres du modèle

EMBALLAGE	Consommation d'emballage par habitant par rapport à 2014	EMBALLAGES ACIER	
		EMBALLAGES ALUMINIUM	
		EMBALLAGES BOIS	
		EMBALLAGES CARTONS ONDULES	
		EMBALLAGES CARTONS PLATS	
		EMBALLAGES PAPIER	
		EMBALLAGES PLASTIQUES SACS	
		EMBALLAGES PLASTIQUES BOITES, TRANSPORT	
		EMBALLAGES PLASTIQUES BOUTEILLES	
		EMBALLAGES PLASTIQUES FILMS	
		EMBALLAGES VERRE	
		Taux de réutilisation	EMBALLAGES ACIER
			EMBALLAGES ALUMINIUM
	EMBALLAGES BOIS		
	EMBALLAGES CARTONS ONDULES		
	EMBALLAGES CARTONS PLATS		
	EMBALLAGES PAPIER		
	EMBALLAGES PLASTIQUES SACS		
	EMBALLAGES PLASTIQUES BOITES, TRANSPORT		
	EMBALLAGES PLASTIQUES BOUTEILLES		
	EMBALLAGES PLASTIQUES FILMS		
	Ratio Production / consommation	Emballages acier	
		Emballages alu	
		Emballages bois	
		Emballages papier cartons	
		Emballages plastiques	
		Emballages verre	

RECYCLAGE	Taux de recyclage à la fabrication	Acier
		Aluminium
		Verre creux
		Verre plat
		Verre autre
		Papier carton emballage
		Papier sanitaire
		Papier graphique
		Papiers spéciaux
		Polyéthylène
		Polypropylène
		PVC
		Polystyrène
		PET
		Autres thermoplastiques
		Polyuréthane
Autres thermodurcissables		



BIENS D'EQUIPEMENT ET DE CONSOMMATION	Consommation en BEC par habitant par rapport à 2014	MECANIQUE
		ELECTRICITE
		ELECTRONIQUE
		DIVERS
		ENGRAIS AZOTE
		ENGRAIS AUTRES
		PHYTOSANITAIRES
		DETERGENTS, SAVONS
		PEINTURE, COLLES, etc.
		PHARMACIE
		TEXTILE
		PAPIER SANITAIRE
		PAPIERS GRAPHIQUE
		PAPIERS SPECIAUX
		SUCRE AGROLIMENTAIRE
	Ratio production / consommation en BEC	MECANIQUE
		ELECTRICITE
		ELECTRONIQUE
		DIVERS
		ENGRAIS AZOTE
		ENGRAIS AUTRES
		PHYTOSANITAIRES
		DETERGENTS, SAVONS
		PEINTURE, COLLES, etc.
		PHARMACIE
		TEXTILE
		PAPIER SANITAIRE
		PAPIERS GRAPHIQUE
		PAPIERS SPECIAUX
		SUCRE AGROLIMENTAIRE
		EOLIEN
		PHOTOVOLTAIQUE
		METHANISATION
		VELO
		2 ROUES
		BUS / CAR
		TRAIN PERSONNES
		VOITURE
		AVION INTERIEUR / PERSONNES
		AVION INTERNATIONAL / PERSONNES
		TRANSPORT FLUVIAL - PERSONNES
		VU LEGER
		POIDS LOURDS
		TRAIN MARCHANDISES
		TRANSPORT FLUVIAL MARCHANDISE
		AVION MARCHANDISES

ENR	Production supplémentaire par rapport à l'année précédente	METHANISATION A LA FERME
		METHANISATION - DECHET
		Méthanisation - industrie
		Méthanisation - STEP
		Méthanisation - Centralisé
		Méthanisation - ISDND
		Eolien - terrestre
		Eolien - off shore
		Photovoltaïque - au sol
		Photovoltaïque - Toiture

TRANSPORT	Transport routier	Rythme de construction des Autoroutes
		Rythme de construction des routes nationales
		Rythme de construction des routes départementales
		Rythme de construction des routes communales
		Développement des routes en béton
	Voies ferrées	Rythme de construction des LGV
		Rythme de construction des autres voies ferrées
		Rythme de construction des métros et RER
		Rythme de construction des tramways
	VOITURE	km.voyageurs
	VOITURE	Taux de remplissage
	VOITURE	Durée de vie
	VOITURE	fateur d'évolution Poids par capacité
	VELO	km.voyageurs
	VELO	Durée de vie
	VELO	fateur d'évolution Poids par capacité
	2 ROUES	km.voyageurs
	2 ROUES	Durée de vie
	2 ROUES	fateur d'évolution Poids par capacité
	BUS / CAR	km.voyageurs
	BUS / CAR	Taux de remplissage
	BUS / CAR	Durée de vie
	BUS / CAR	fateur d'évolution Poids par capacité
	TRAINS PERSONNES	km.voyageurs
	TRAINS PERSONNES	Taux de remplissage
	TRAINS PERSONNES	Durée de vie
	TRAINS PERSONNES	fateur d'évolution Poids par capacité
	TRANSPORT FLUVIAL - PERSONNES	km.voyageurs
	TRANSPORT FLUVIAL - PERSONNES	Taux de remplissage
	TRANSPORT FLUVIAL - PERSONNES	Durée de vie
	TRANSPORT FLUVIAL - PERSONNES	fateur d'évolution Poids par capacité
	AVIONS INTERIEUR - PERSONNES	km.voyageurs
	AVIONS INTERIEUR - PERSONNES	Taux de remplissage
	AVIONS INTERIEUR - PERSONNES	Durée de vie
	AVIONS INTERIEUR - PERSONNES	fateur d'évolution Poids par capacité
	AVIONS INTERNATIONAL - PERSONNES	km.voyageurs
	AVIONS INTERNATIONAL - PERSONNES	Taux de remplissage
	AVIONS INTERNATIONAL - PERSONNES	Durée de vie
	AVIONS INTERNATIONAL - PERSONNES	fateur d'évolution Poids par capacité
	POIDS LOURDS	t.km
	POIDS LOURDS	taux de remplissage
	POIDS LOURDS	Durée de vie
	POIDS LOURDS	fateur d'évolution Poids par capacité
	TRAIN - MARCHANDISES	t.km
TRAIN - MARCHANDISES	taux de remplissage	
TRAIN - MARCHANDISES	Durée de vie	
TRAIN - MARCHANDISES	fateur d'évolution Poids par capacité	
VU LEGER	t.km	
VU LEGER	taux de remplissage	
VU LEGER	Durée de vie	
VU LEGER	fateur d'évolution Poids par capacité	
TRANSPORT FLUVIAL - MARCHANDISES	t.km	
TRANSPORT FLUVIAL - MARCHANDISES	taux de remplissage	
TRANSPORT FLUVIAL - MARCHANDISES	Durée de vie	
TRANSPORT FLUVIAL - MARCHANDISES	fateur d'évolution Poids par capacité	
AVION - MARCHANDISES	t.km	
AVION - MARCHANDISES	taux de remplissage	
AVION - MARCHANDISES	Durée de vie	
AVION - MARCHANDISES	fateur d'évolution Poids par capacité	



PRODUCTION MATERIAUX	Ratio production / consommation	Aluminium
		Travail de l'aluminium
		Clinker
		Ciment
		Verre
		Ammoniac
		Chlore
		Soude
		Ethylène
		Propylène
		BTX
		Coupes C4
		Sucre
		Verre plat
		Verre autres
		Béton
		Ceramiques
		Lubrifiants
		Cires, paraffines
		Pâte à papier vierge
		Caoutchoucs
		Polyéthylène
		Polypropylène
		PVC
		Polystyrène
		PET
		Autres thermoplastiques
		Polyuréthane
		Autres thermodurcissables

BTP	Rythme de Construction	Maison individuelle
		Logement collectif
		Tertiaire CHEB
		Complément Tertiaire hors CHEB
		Bâtiments industriels et agricoles
	Rythme de Rénovation BBC	Maison individuelle
		Logement collectif
		Tertiaire
	Rythme de Réno. non BBC	Maison individuelle
		Logement collectif
		Tertiaire
	Surface moyenne	Maison individuelle neuve
		Logement collectif neuf
	Modes constructifs Maison individuelle neuve	Structure bois
		Inertie géosourcée
	Modes constructifs Logement collectif neuf	Structure bois
		Inertie géosourcée
	Modes constructifs Tertiaire neuf	Structure bois
		Inertie géosourcée
	Modes constructifs Bâtiments industriels et agricoles	Structure bois
		Inertie géosourcée
Isolation (neuf) Indicateur de résistance thermique	Toiture	
	Planchers	
	Murs	
Isolation (neuf)	Part de marché du triple vitrage	
PVC	Part de marché des menuiseries PVC	
	Part de marché des tubes d'évacuation EU/EV en PVC	
	Part des sols PVC dans le marché des sols souples	
Isolants biosourcés	Part de marché des isolants biosourcés	
	Part de marché des isolants biosourcés en Charpente bois	
Polystyrène	Part de marché du PSE/PSX en murs	
Polyuréthane	Part de marché du PU en toiture	
Part du bardage bois dans marché des bardages	MI	
	LC	
	Tertiaire	
	Industrie / Agriculture	
CIMENT	Taux d'ajout au clinker	
	Taux d'import de ciment	



8. Références bibliographiques

- 2ACR, DGE, ADEME. (2015). *La chaîne de valeur du recyclage des plastiques en France* : A3M. (2012). *Comment fabrique t'on l'acier ?* Récupéré sur <http://www.acier.org>
- Adeline DIONISI. (2013, Novembre). *BardageInfo #4*. Récupéré sur www.etancheite.com/
www.etancheite.com/Files/pub/Fede_N05/AUTO_MI_8761_CONTENTU_8761/4cacd8a3050d4350bfdd9fec74eaaceb/EDIT/BI_04_Dossier.pdf
- ADEME. (2014). *Etude prospective sur la collecte et le tri des déchets d'emballages et de papier dans le secteur public de gestion des déchets*.
- ADEME. (2017). *Bilan national du recyclage 2005-2014*.
- ADEME. (2017). *Etude sur la filière éolienne française - bilan prospective stratégie*.
- ADEME. (2017). *Vision prospective 2030-2050*.
- ADEME. (2018). *La valorisation des emballages en France*.
- ADEME. (Travaux achevés en 2014). *OPEN Observatoire Permanent de l'amélioration ENergétique du logement*.
- ADEME, & BioByDeloitte. (2017). *Bilan national du recyclage 2005-2014*.
- ADEME, & SEREHO. (2017). *Actualisation 2016 des flux de produits graphiques en France*.
- Aluminium.fr. (2018). Récupéré sur Le portail de l'aluminium en France: <https://www.aluminium.fr/>
- ASFA. (2011). *Chiffres clés 2011 - Autoroutes et ouvrages à péage*. Edit&moi.
- ATILH, F. C. (2018, Septembre 6). Etat de l'art et perspectives sur le ciment et ses adjuvants. (TR, Intervieweur)
- BatiEtudes, relayé sur Tokster. (2016, Septembre). *Les 5 chiffres-clés du marché français des fenêtres*. Récupéré sur <https://tokster.com/>: <https://tokster.com/article/les-5-chiffres-cles-du-marche-francais-des-fenetres>
- Batirama. (2016, Mai). *Bardage bois : retour aux fondamentaux*. Récupéré sur <https://www.batirama.com/>
<https://www.batirama.com/article/12909-bardage-bois-retour-aux-fondamentaux.html>
- BIRAT, J.-P. (2017). *Principaux produits sidérurgiques - Acier, applications et modes de production*. Techniques de l'ingénieur.
- BIRAT, J.-P. (2017). *Principaux produits sidérurgiques - Aciers, applications et modes de production / Réf. : M7020 V4*. Techniques de l'ingénieur.
- Boulamanti, Aikaterini, & Jose A. Moya. (2017). Production Costs of the Chemical Industry in the EU and Other Countries: Ammonia, Methanol and Light Olefins. *Renewable and sustainable energy reviews*, 1205-12.
- Businesscoot. (2016). *Le Marché des Revêtements de Sol | France*. Récupéré sur <https://www.businesscoot.com/>: <https://www.businesscoot.com/fr/page/le-marche-des-revetements-de-sol>
- Cellule Economique de Bretagne pour FranceBoisForet et CODIFAB. (2017). *Enquête nationale de la construction bois - activité 2016*.
- CEPS. (2014). *FOR A STUDY ON COMPOSITION AND DRIVERS OF ENERGY PRICES AND COSTS IN ENERGY INTENSIVE INDUSTRIES: THE CASE OF THE CHEMICAL INDUSTRY - AMMONIA*.
- CEREMA. (2017). *500 maisons rénovées basse consommation Enseignements opérationnels des programmes « Je rénove BBC » en Alsace*. Collection Connaissances.
- CGDD. (2015). *L'activité de la pétrochimie en France Données 2014*.
- Chimie, F. (2018). Donnée non publiée - dire d'expert. (E. Rauzier, Intervieweur)
- Chimie, F. (2018). Données non publiées - Dire d'expert.
- CIM Béton, ATILH et Syndicat Français de l'Industrie Cimentière. (2008). *Infociments 2008, statistiques sur l'année 2007*.
- CIM Béton, ATILH et Syndicat Français de l'Industrie Cimentière. (2015). *Infociments 2015, statistiques sur l'année 2014*.
- Cohan, & Le Souder. (2013, Janvier). Ammonitrate, solution azotée ou urée : les bons critères de choix. *Perspectives agricoles*, 396.
- Commission Européenne. (2011). *Preparatory study for review of regulation (EC) No 842/2006 on certain fluorinated greenhouse gases*.
- COPACEL. (2014). *Rapport statistique 2014 de l'industrie papetière française*.
- CSTB pour ADEME. (2018 (relecture en cours)). *Etude prospective sur la construction neuve*.
- CTICM, CERIB, FCBA, CETIAT et LMDC Toulouse (financement ADEME). (2016). *BATINDUS - ETAT DES LIEUX SUR LES ENJEUX ENERGETIQUES DES BATIMENTS INDUSTRIELS SELON LEUR TYPOLOGIE (AGE, USAGE, ARCHITECTURE)*.
- CYCLECO, ADEME. (2015). *Analyse du Cycle de Vie de la production d'électricité*.
- DATALAB. (2016, Décembre). *Les infrastructures linéaires de transport : évolutions depuis 25 ans*. Récupéré sur <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>: <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2587/1539/infrastructures-lineaires-transport-evolutions-depuis-25.html>
- DATALAB. (2017, Mars). *Compte du logement 2015 - Rapport de la commission des comptes du logement*. Récupéré sur <https://www.cscs.fr/images/files/datalab-15-compte-logement-2015-2016.pdf>
- DECHEMA. (2017). *Low carbon energy and feedstock for the european chemical industry*.

- DEVELOPPEMENT & CONSEIL, pour Ministère de l'Economie des Finances et de l'Industrie. (2005). *ETUDE PROSPECTIVE - L'acier dans la construction au regard du Développement Durable*.
- DGE. (2015). *Chiffres clés de l'industrie manufacturière 2014*.
- DGE. (2015). *Tableau de bord mensuel de l'activité industrielle Janvier 2015*.
- Effinergie. (2016). *Observatoire BBC, Retour d'expérience, la rénovation basse consommation*.
- Effinergie. (Consulté en 2018). *Observatoire BBC*. Récupéré sur <https://www.observatoirebbc.org/>
- EU Commission. (2013). *BREF Best available technology Referenc document for the manufacture of glass*.
- EU JRC. (2013). *Document for the Manufacture of Glass*. Récupéré sur 2013 EU BREF Best Available Techniques (BAT) Reference: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/gls.html>
- EU, c. (2018). *European steel - The wind of change*.
- EuroChlor. (2016). *Chlorine industry review 2014-2015*.
- EUROFER. (2015). *European steel in Figures*.
- EUROSTAT. (2014). *Production totale, vendue, importée, exportée par code PRODCOM*. Récupéré sur <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/data/database>
- Fedeverre. (s.d.). *Fédération des industries du verre*. Récupéré sur <http://www.fedeverre.fr/>
- FFA. (2017). *Comment fabrique t'on l'acier ?*
- ForumConstruire.com. (2016, Décembre). *BatiWeb*. Récupéré sur <http://www.batiweb.com/actualites/vie-des-societes/construction-de-maison-les-materiaux-les-plus-utilises-sont-07-12-2016-29516.html>
- FranceChimie. (2018, novembre 3). Données non publiées - dire d'expert. (E. Rauzier, Intervieweur) France.
- FranceCulture. (2018). Les techniques publicitaires sont beaucoup plus agressives et intrusives qu'auparavant.
- GRDF; ADEME; Solagro;. (2017). *Evaluation du potentiel de méthanation à partir de gaz industriels fatals (hydrogène et dioxyde de carbone)*.
- INFOCIMENT. (2008). *L'essentiel*.
- INRS, B. S. (2017). *Le 1,3-butadiène : mise à jour des connaissances et évaluation de l'exposition en milieu de travail*. HALL.
- INSEE. (2017). *Les conditions de logement en France (extrait p142-143)*. Récupéré sur Insee Références: https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/2586024/LOGFRA17k2_F6.2.pdf
- INSEE. (2017). *Les conditions de logement en France (extrait p96-97)*. Récupéré sur Insee Références: https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/2586036/LOGFRA17f3_F1.3.pdf
- ISPT. (2017). *Power to ammonia*.
- Laurent ROUSSELLE, L. n. (2018). *Les industriels de l'emballage plastique vont bien...mais jusqu'à quand ?* Récupéré sur <https://www.usinenouvelle.com/article/les-industriels-de-l-emballage-plastique-vont-bien-mais-jusqu-a-quand.N753464>
- Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire - Commissariat général au Développement durable. (2018, Octobre). *SIT@DEL 2*. Récupéré sur <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-ligne/r/sitdel2-donnees-detaillees-logements.html>
- MOUNIER, C. (2018). La filière aluminium française.
- MTES, M. d. (2017). *Plan Climat - Plan de rénovation énergétique des bâtiments*. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/renovation-energetique-des-batiments-plan-accelerer-mobilisation-generale>.
- Organisations professionnelles de l'industrie cimentière. (2018, Janvier). *Matières & Produits - Ciments - Types et Composition*. Récupéré sur <https://www.infociments.fr/>: <https://www.infociments.fr/ciments/types-et-composition>
- PAPREC. (2019). *Recyclage des palstiques*. Récupéré sur <https://www.paprec.com>
- Plastics Europe. (2014). *Consommation de résines vierges par les transformateurs*.
- POUGET Consultants. (2015, Mars). *Bâtiments résidentiels : Typologie du parc existant et solutions exemplaires pour la rénovation énergétique en France (Base TABULA - Episcopes), 121 p.*
- Productivity, I. f. (s.d.). *Industrial efficiency technology databsase*. Récupéré sur <http://ietd.iipnetwork.org/content/glass>)
- RIO TINTO. (2019). *production-bauxite-alumine-aluminium*. Récupéré sur Aluminium.fr: <https://www.aluminium.fr/aluminium/production-bauxite-alumine-aluminium>
- SCF. (2014). *Société chimique de France, les plastiques*. Récupéré sur <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/acc.htm>
- SCF Société Chimique de France. (2015b). *Le dichlore*. Récupéré sur <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/acc.htm>
- SCF, S. c. (2014). *Caoutchoucs*. Récupéré sur <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/acc.htm>
- SCF, S. c. (2014). *Chimie organique*. Récupéré sur <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/acc.htm>
- SCF, S. c. (2014). *Le vapocraquage*. Récupéré sur <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/acc.htm>
- SCF, S. c. (2015). *Aluminium, alumines*. Récupéré sur <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/acc.htm>



- SCMF - Syndicat de la Construction Métallique de France. (2017, Mars). *COMMUNIQUÉ DE PRESSE - La construction métallique en France : un secteur qui confirme toute sa dynamique*. Récupéré sur www.n-schilling.com
- SFEC – syndicat français des enducteurs calendriers. (2012). *Marché : Les revêtements de sols souples séduisent de plus en plus d'acheteurs*. Récupéré sur <http://www.cote-sols.fr>: <http://www.cote-sols.fr/tendances/marche-les-revetements-de-sols-souples-seduisent-de-plus-en-plus-dacheteurs/>
- SNBPE, U. (2015). *L'industrie française du béton prêt à l'emploi en 2014*.
- SNCP, S. N. (2014). Récupéré sur <https://www.lecaoutchouc.com/economie/production>
- SOLAGRO. (2016). *Le scénario Afterres 2050*.
- TBC. (2017). *Le marché des fenêtres en France au beau fixe (étude)*. Récupéré sur <http://www.batiweb.com>: <http://www.batiweb.com/actualites/vie-des-societes/le-marche-des-fenêtres-en-france-au-beau-fixe-etude-18-04-2017-30287.html>
- TBC pour ADEME. (2018 (relecture en cours)). *Etude prospective sur la rénovation des logements*.
- UNEP. (2011). *Recycling rates of metals*.
- UNICEM. (2015). *Statistiques 2014 - Union nationale des Industries de Carrières et Matériaux de Construction*.
- UNPG - Union nationale des producteurs de Granulats. (Consulté en 2018). *A quoi servent-ils ? UN MATÉRIAU INDISPENSABLE POUR LA CONSTRUCTION*. Récupéré sur <http://www.unpg.fr>: <http://www.unpg.fr/accueil/nos-activites/a-quoi-servent-ils/>
- UNPG. (2015). *L'industrie française des granulats en 2014*.
- Valbiom. (2015). *Molécules issues de la valorisation de la lignine*.
- Virage_Energie. (2013). *Scénarios de sobriété énergétique et transformations sociétales*.
- Wikipedia. (2019). *Article Clinker*. Récupéré sur Wikipedia: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Clinker>

9. Index des tableaux et figures

TABLEAUX

Tableau 1: Distinctions entre matériaux, matériaux intermédiaires et BEC dans les différents secteurs NCE.....	21
Tableau 2 : Ensemble des biens couverts par le secteur de la mécanique	22
Tableau 3 : Chiffre d'affaire et commerce du secteur de la mécanique	22
Tableau 4 : Ensemble des biens couverts par le secteur de l'électricité	23
Tableau 5 : Ensemble des biens couverts par le secteur de l'électronique.....	23
Tableau 6 : Chiffre d'affaire et commerce du secteur de l'électricité et de l'électronique	23
Tableau 7 : Ensemble des biens couverts par le secteur du textile.....	24
Tableau 8 : Chiffre d'affaire et commerce du secteur textile et habillement.....	25
Tableau 9 : Ensemble des biens couverts par le secteur des divers	25
Tableau 10 : Chiffre d'affaire et commerce du secteur des divers	26
Tableau 11 : Différents types d'engrais et pourcentage d'azote	27
Tableau 12 : Flux des engrais azotés en masse et en valeur (EUROSTAT, 2014).....	27
Tableau 13 : Chiffre d'affaire et commerce des phytosanitaires en 2014	27
Tableau 14 : Chiffre d'affaire et commerce des détergents solvants et produits d'entretien	28
Tableau 15 : Chiffre d'affaire et commerce des secteurs peintures colles encres et autres (FranceChimie, 2018).....	28
Tableau 16 : Chiffre d'affaire et commerce pour le secteur de la pharmacie	28
Tableau 17 : Production, Import export pour le secteur des emballages vides et consommation d'emballages pleins et réutilisés en million de tonnes (ADEME, 2018).....	31
Tableau 18 : Consommation papier graphique 2014 et évolution 2050.....	33
Tableau 19 : Hypothèses ADEME sur les évolutions pour les emballages d'ici à 2030 (ADEME, 2014).....	34
Tableau 20 : Développement de l'éolien d'ici 2050 - (ADEME, 2017)	54
Tableau 21 : Bilan matières des typologies d'éoliennes (CYCLECO, ADEME, 2015).....	54
Tableau 22 : taux d'importation des éléments constitutifs des éoliennes (ADEME, 2017)	55
Tableau 23 : Perspective d'évolution de production photovoltaïque (ADEME, 2017) et dire d'expert ADEME.....	55
Tableau 24 : Bilan matière du photovoltaïque (Données ADEME).....	55
Tableau 25 : Evolution de la production des unités de méthanisation d'ici 2050 (ADEME, 2017).....	56
Tableau 26 : Hypothèse pour la production additionnelle annuelle en GWh EP pour la méthanisation	56
Tableau 27 : Caractéristiques des typologies de méthaniseurs modélisés.....	57
Tableau 28 : Composition matière des méthaniseurs en tonne/GWh/an	57
Tableau 29 : Nombre d'unités par an - Consolidation des données (EUROSTAT, 2014)	59
Tableau 30 : masses des matériaux considérés par véhicule pour 2014 (en kg).....	60
Tableau 31 : Evolution des t.km et km.voyageurs pour le secteur des transports.....	61
Tableau 32 : Utilisation des produits y compris des aciers spéciaux. Consommation finale d'acier dans l'UE-28 entre 2010 et 2014 et dans le monde en 2011 ((BIRAT, Principaux produits sidérurgiques - Aciers, applications et modes de production / Réf. : M7020 V4 , 2017).....	66
Tableau 33 : valeurs comparées et retenues pour les usages de l'acier en France	67
Tableau 34 : Production et commerce des lingots d'aluminium primaire et secondaire	71
Tableau 35 : Usage comparatifs de l'aluminium dans le Monde, en Europe et supposé en France	72
Tableau 36 : efficacité de récupération optimale et globale calculée à partir des différentes filières	73
Tableau 37 : adjuvants entrant dans la composition du ciment (données Infociments sur l'année 2014 (CIM Béton, ATILH et Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, 2015))	75
Tableau 38 : utilisation du ciment par usage final du béton (Source : (CIM Béton, ATILH et Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, 2008).....	76
Tableau 39 : Constituants dans les principaux types de verre (EU Commission, 2013).....	81
Tableau 40 : Production et commerce de différents types de verre	82
Tableau 41 : Taux d'incorporation du verre pour différentes filières en 2014 (ADEME, Bilan national du recyclage 2005-2014, 2017).....	83
Tableau 42 : Comparatif des productions et du commerce de produits de base issus du vapocraquage selon diverses sources (EUROSTAT, 2014) (CGDD, 2015)	89
Tableau 43 : Calcul théorique des quantités d'intrants de la chimie organique nécessaires à la production de plastiques en France à partir de données issues du Tableau 58.....	89
Tableau 44 : Répartition des usages pour l'éthylène	90
Tableau 45 : Répartition des usages de l'oxyde d'éthylène (SCF S. c., Chimie organique, 2014).....	90



Tableau 46 : Répartition des usages pour le propylène.....	92
Tableau 47 : Récapitulatif des productions et commerce des coupes C4 en 2014.....	94
Tableau 48 : usages du butadiène en 2014 en France (INRS, 2017)	94
Tableau 49 : usages supposés du butylène	95
Tableau 51 : Production et consommation des caoutchoucs en France (SCF S. c., Caoutchoucs, 2014) ..	95
Tableau 52 : production et consommation de pneumatiques et autres (SCF S. c., Caoutchoucs, 2014)	95
Tableau 53 : Usage des pneumatiques (SNCP, 2014).....	96
Tableau 54 ; Autres usages des caoutchoucs (SNCP, 2014).....	96
Tableau 55 : Usages du toluène.....	96
Tableau 56 : Comparaison de la production et de la consommation (P/C) pour plusieurs composants de la chimie organique de base	97
Tableau 57 : classification des matières plastiques (PAPREC, 2019)	100
Tableau 58 Bilan de production et de consommation des plastiques pour la France.....	102
Tableau 59 : Flux des déchets contenant du plastique et des résines recyclées	103
Tableau 60 : Répartition des différents plastiques dans les MPR produits et effectivement consommés en France	104
Tableau 61 : Répartition des résines vierges consommées par les transformateurs en fonction de leur type et de leur usage pour la France (Plastics Europe, 2014)	105
Tableau 62 : Répartition par interpolation du total des résines MPV et MPR	105
Tableau 63 : Répertoire et commerce de produits plastiques transformés (EUROSTAT, 2014)	106
Tableau 64 : Recoupement statistique entre PlasticsEurope et EUROSTAT pour les produits transformés	106
Tableau 65 : répartition pour chaque famille d'usages des différents plastiques à travers la consommation de produits plastiques transformés	107
Tableau 66 : répartition des usages à la production et à la consommation de plastiques transformés ...	107
Tableau 67 : Demande de matières plastiques, gisements de déchets et taux de recyclage en UE en 2014 (ADEME, Bilan national du recyclage 2005-2014, 2017)	109
Tableau 68 : Bilan matière production chlore par électrolyse de solution de NaCl	110
Tableau 69 : Bilan matière production chlore par électrolyse de solution de KCl	110
Tableau 70 : Performances énergétiques des différents procédés d'électrolyse pour la production de dichlore ((SCF Société Chimique de France, 2015b)).....	110
Tableau 71 : Liste des sites de production de dichlore en France en 2017 (EuroChlor, 2016).....	111
Tableau 72 : Bilan du dichlore en France	111
Tableau 73 : Utilisation du dichlore ; Données : (EuroChlor, 2016), ProdCom.....	112
Tableau 74 : Bilan PVC et Chlorure de vinyle monomère	113
Tableau 75 : Liens vers les secteurs aval de la consommation de dichlore.....	114
Tableau 76 : Bilan de réaction de production d'ammoniac par vaporeformage de méthane	116
Tableau 77 : Bilan massique de production d'ammoniac par vaporeformage du gaz naturel.....	116
Tableau 78 : Liste des sites de production d'ammoniac en France	116
Tableau 79 : Bilan Ammoniac France.....	117
Tableau 80 : Statistiques engrais azoté, en équivalent Azote (N), France	117
Tableau 81 : Bilan d'approvisionnement français 2014 des principaux produits « aval » de l'ammoniac en ktN/a (Source ProdCom)	119
Tableau 82 : Bilan de l'utilisation de l'ammoniac en France	119
Tableau 83 : Comparaison des déterminants pouvant influencer le choix entre l'ammonitrate et l'urée .	121
Tableau 84 : Comparaison des consommations d'énergies et des émissions GES spécifiques des procédé de production d'ammoniac.	123
Tableau 85 : Bilan actuel de pâte à papier vierge (Source : COPACEL).....	126
Tableau 86 : Bilan d'approvisionnement du bois pour la papeterie (Source : COPACEL).....	126
Tableau 87 : Bilan de pâte à papier recyclée (Source : COPACEL)	127
Tableau 88 : Bilan du recyclage selon le type de papier (Source : COPACEL)	127
Tableau 89 : Bilan actuel du papier	128
Tableau 90 : Consommation française de papier, part type de papier (Source : COPACEL)	129
Tableau 91 : Bilan papiers graphiques (Source : COPACEL)	129
Tableau 92 : Répartition par usage du papier graphique en France (ADEME & SEREHO, Actualisation 2016 des flux de produits graphiques en France, 2017)	129
Tableau 93 : Bilan papiers emballage (Source : COPACEL).....	130
Tableau 94 : Consommation française des différents types de papiers d'emballage	130
Tableau 95 : Bilan papiers hygiène (Source : COPACEL).....	131
Tableau 96 : Bilan papiers spéciaux (Source : Solagro d'après COPACEL).....	132

Tableau 97 : Principales applications de la lignine à différents horizons de temps (Valbiom, 2015)	134
Tableau 98 : Bilan sucre (Source : CEDUS).....	137
Tableau 99 : Répartition de la consommation de sucre en France par usage (Source : CEDUS).....	137



FIGURES

Figure 1 : matrice de référence de consommation de matériaux pour la production de produits finis pour une année donnée	12
Figure 2 : exemple d'interactions entre matériaux, matériaux intermédiaires et biens de consommation/équipement.....	12
Figure 3 : Principe de matrices permettant d'articuler la production et la consommation de matériaux intermédiaires	13
Figure 4 : Combinaison des approches ascendantes et descendantes pour la consolidation de l'état des lieux.....	13
Figure 5 : Cartographie 2014 des flux de matériaux.....	14
Figure 6 : Schéma du cycle de vie d'un matériau et flux de transformation.....	19
Figure 7: Répartitions des consommations d'emballages pleins selon leur usage et leur matériau constitutif (ADEME, 2014) (Adapté pour l'année 2014)	29
Figure 8 : Tonnage comparatifs des emballages neufs et réutilisés consommés en France en 2014 (Estimation ADEME).....	30
Figure 9 : Schéma type des flux d'emballages vides, pleins et réutilisés.....	30
Figure 10 : Etat des lieux du rythme de construction en 2015 et en 2014 (année de référence de l'étude)	36
Figure 11 : Calcul des surfaces moyennes en résidentiel, d'après DATALAB	36
Figure 12 : Principaux paramètres de morphologie du secteur résidentiel, et sources.....	37
Figure 13 : Principaux paramètres de morphologie des bâtiments des secteurs tertiaire et industriel/agricole.....	37
Figure 14 : scénario proposé d'évolution de la construction neuve, traduit en millier de m ² / an	38
Figure 15 : Parts de marchés des procédés constructifs par typologie de bâtiment, et sources	38
Figure 16 : scénario d'évolution de la part de marché de la construction bois dans le neuf	39
Figure 17 : résumé des principales hypothèses de modélisation des maisons individuelles et groupées	39
Figure 18 : résumé des principales hypothèses de modélisation des logements collectifs	40
Figure 19 : résumé des principales hypothèses de modélisation des bâtiments tertiaires	40
Figure 20 : résumé des principales hypothèses de modélisation des bâtiments industriels et agricoles..	41
Figure 21 : répartition du marché des menuiseries par matériaux (Source : BatiEtudes, publié sur tokster.com)	41
Figure 22 : répartition simplifiée du marché des menuiseries par matériaux intégrée dans l'outil	41
Figure 23 : détail des hypothèses concernant les isolants en construction neuve (en 2014)	42
Figure 24 : répartition du marché des bardage par matériaux intégrée dans l'outil (MI : maison individuelle, LC : logement collectif).....	43
Figure 25 : développement des isolants biosourcés.....	44
Figure 26 : développement du bardage bois	44
Figure 27 : historique des rénovations BBC (Source : observatoire BBC d'Effinergie).....	45
Figure 28 : scénario de rénovation BBC du parc résidentiel, en nombre de logement	46
Figure 29 : répartition du marché des menuiseries (source : TBC, cité sur batiweb)	47
Figure 30 : répartition des parts de marché en rénovation BBC (source : Effinergie).....	47
Figure 31 : détail des hypothèses concernant les isolants en rénovation BBC (en 2014)	48
Figure 32 : comparaison de l'évolution de la part de marché du biosourcé en murs en maison individuelle entre la rénovation BBC et la rénovation non BBC	49
Figure 33 : répartition par nombre de voies des autoroutes (source : ASFA).....	49
Figure 34 : résultat de la modélisation du BTP pour le béton : la part non précisément identifiée est de 6%	51
Figure 35 : résultat de la modélisation du BTP pour l'acier : la part non précisément identifiée est de 34% (dans le bâtiment neuf et rénové)	51
Figure 36 : résultat de la modélisation du BTP pour l'aluminium, le verre, le PVC et les autres plastiques : les volumes non précisément identifiés représentent respectivement 37%, 0%, 10% et la totalité du PE et PP).....	51
Figure 37 : résultat de la modélisation de l'année 2014 pour les différents matériaux du secteur des TP ..	52
Figure 38 : approche utilisée pour la modélisation du secteur des transports.....	58
Figure 39 : Classification des incertitudes relatives aux volumes de production du secteur du transport (du rouge plus incertain, au vert moins incertain).....	60
Figure 40 : Evolution des km.voyageurs en France entre 2014 et 2050	61
Figure 41 : Evolution des t.km en France entre 2014 et 2050	62
Figure 42 : illustration du paramètre poids unitaire du véhicule	63
Figure 43 Diagramme de production et de transformation de l'acier	64
Figure 44: Diagramme de production et de transformation de l'acier	65

Figure 45 : Les flux de production de l'acier en 2014 (en kt).....	65
Figure 46 : réduction directe de l'acier par hydrogène	68
Figure 47 : Comment est fabriqué l'aluminium ? (RIO TINTO, 2019)	70
Figure 48 : Diagramme des flux pour l'aluminium en 2014.....	71
Figure 49: Evolution de la production d'aluminium primaire, secondaire et de la demande en matériau et en produits finis (MOUNIER, 2018)	72
Figure 50 : Modélisation de l'année 2014 : répartition globale des usages du béton dans le BTP	76
Figure 51 : Modélisation de l'année 2014 : répartition des usages du béton dans le Bâtiment	77
Figure 52 : Modélisation de l'année 2014 : répartition des usages du béton dans les TP	77
Figure 53 : Historique de la production de ciment par catégorie (Source : Infociments 2011 à 2016)	79
Figure 54 : Schéma descriptif des différentes classes d'utilisation du ciment (SNBPE, 2015)	79
Figure 55 : Comment est fabriqué le verre? (Productivity, s.d.).....	82
Figure 56 : diagramme des flux pour les verres creux et plats en 2014 (ADEME, Bilan national du recyclage 2005-2014, 2017).....	83
Figure 57 schéma global des intrants de la chimie des produits intermédiaires et des produits finis (Source France Chimie)	86
Figure 58 : schéma de base de la chimie organique (SCF S. c., Le vapocraquage, 2014)	87
Figure 59 : Répartition des usages de l'éthylène	92
Figure 60 : Répartition des usages du propylène	93
Figure 61: récapitulatif des usages pour les coupes C4	95
Figure 62 : récapitulatif des usages pour les BTX	97
Figure 63 : Chaîne de transformation des plastiques, issu de (SCF, 2014)	99
Figure 64 : Cycle de vie des plastiques en France en 2014 (ADEME, Bilan national du recyclage 2005-2014, 2017).....	101
Figure 65 : Chaîne de transformation des matières plastiques.....	101
Figure 66 : Flux de déchets plastiques en France par origine en tonnes par an en 2012 (2ACR, DGE, ADEME, 2015).....	103
Figure 67 : Bilan d'approvisionnement en dichlore.....	111
Figure 68 : Procédé simplifié de production d'ammoniac à partir de méthane	115
Figure 69 : Bilan production consommation d'ammoniac en France	117
Figure 70 : Consommation d'engrais azoté en France par type de produit (Source : UNIFA).....	119
Figure 71 : Part de marché des engrais azoté en France (Source : UNIFA).....	120
Figure 72 : Évaluation des coûts de production de l'ammoniac selon la région de production (Boulamanti, Aikaterini, & Jose A. Moya, 2017)	120
Figure 73 : procédé simplifié de production d'ammoniac à partir de d'hydrogène électrolysé (DECHEMA, 2017).....	123
Figure 74 : Procédé papetier	125
Figure 75 : Bilan actuel de pâte à papier vierge (Source : COPACEL)	126
Figure 76 : Bilan d'approvisionnement du bois pour la papeterie (Source : COPACEL)	126
Figure 77 : Bilan papiers emballage (Source : COPACEL)	130
Figure 78 : Bilan papiers hygiène (Source : COPACEL)	131
Figure 79 : Bilan papiers spéciaux (Source : Solagro d'après COPACEL)	131
Figure 80 : Bilan papier tous usages (Source : COPACEL)	132
Figure 81 : Procédé sucrier à partir de betterave (Source : SNFS)	135
Figure 82 : Localisation des usines (Source : CEDUS)	136
Figure 83 : Bilan sucre (Source : CEDUS)	137
Figure 84 : Principe de modélisation.....	138



10. Sigles et acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFPIA	Association pour la Formation Professionnelle dans les Industries de l'Ameublement
BE	Bois énergie
BEC	Biens d'équipement ou de Consommation
BI	Bois industrie
CA	Chiffre d'Affaire
CCR	Caisse Cartons de Récupération
CO	Monoxyde Carbone
CVM	Chlorure de vinyle monomère (C ₂ H ₃ Cl)
DCM	Dychlorométhane (CH ₂ Cl ₂)
DEG	Di éthylène glycol
EDC	Dichloréthane (C ₂ H ₄ Cl ₂)
EEE	Equipements Electriques et Electroniques
IFA	International Fertilizer Association
LC	Logement collectif
M€	Million d'euros
MEG	Monoéthylène glycol
MI	Maison individuelle
MPR	Matière première recyclée
Mt	Million de tonnes
NAF	Nomenclature d'Activités Française
ND	Non disponible
P/C	Production sur Consommation
PME	Petites et Moyennes Entreprises
PCR	Papiers et Cartons à Recycler
PE	Polyéthylène
PEG	Polyéthylène glycol
PER	Perchloréthylène (C ₂ Cl ₄)
PET	Polyéthylène téréphtalate
PP	Polypropylène
PTFE	téflon
PU	Polyuréthane
PVC	Polychlorure de vinyle
TEG	Tri éthylène glycol
TRI	Trichloréthylène (C ₂ Cl ₃ H)
VHU	Véhicules Hors d'Usage

11. Liste des experts ayant contribué à la cartographie de référence

Les personnes ont contribué à consolider la cartographie de l'année de référence. Les auteurs de l'étude les remercient vivement pour les entretiens qu'ils leur ont accordés.

NOM	Prénom	Structure	Domaine
AUBRY	Rémi	SNFS	Sucre
BARDINAL	Marc	ADEME	
BAUDRY	Rachel	ADEME	Recyclage
BILLEAU	Sébastien	ADEME	Eolien
BIRAT	Jean-Pierre	Retraité ARCELOR	Acier
BORDES	Pascal	YARA	Engrais
CAPILLA	Xavier	Fedeverre	Verre
COMBET	Emmanuel	ADEME	Energies renouvelables
COPIN	Fabrice	ATILH	Ciment, béton
CREON	Nicolas	A3M	Acier
DADOU-WILLMANN	Claire	2ACR	Plastiques
DE WARREN	Nicolas	ARKEMA	PVC
EVEILLARD	Philippe	UNIFA	Engrais
FAUVERGUE	Pierre	Kem One	Chimie
LAUVERJAT	Jean	CGDD	Chimie
LE VELY	Didier	France Chimie	Chimie
LEMOUX	Jan	COPACE	Papier
LENAIN	Yves	France	Chimie
LENET	Sylvain	COPACEL	Papier
LEONARDON	Philippe	ADEME	Bâtiment
MILLET	Hervé	PlasticsEurope	Plastiques
MOUNIER	Cyrille,	AFA	Aluminium
MURET	Bruno	SNCP	Caoutchoucs
PASQUIER	Sylvain	ADEME	Emballages
PASQUIER	Maxime	ADEME	Transports
PERIGORD	Arnaud	A3M	Acier
VANACKERE	Gilles	SNFS	Sucre
VIGNES	Jean-Louis	Sté chimique de France	Chimie
WALLE	Bertrand	BOREALIS	Engrais



L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources. Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse. Dans tous les domaines - énergie, air, économie circulaire, gaspillage alimentaire, déchets, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions. À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et solidaire et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

www.ademe.fr/

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous un regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

TRANSITION INDUSTRIELLE - PROSPECTIVE ENERGIE MATIERE : VERS UN OUTIL DE MODELISATION DES NIVEAUX DE PRODUCTION

Afin d'éclairer les débats autour de la transition énergétique et environnementale, l'ADEME propose depuis plusieurs années un scénario permettant d'imaginer à horizon 2050, la trajectoire de la demande en énergie et le mix énergétique des grands secteurs consommateurs d'énergie que sont le transport, le bâtiment, l'agriculture et l'industrie. Les deux principaux déterminants de la demande en énergie pour le secteur industriel sont les niveaux de production et le niveau d'efficacité énergétique et à ce jour si les perspectives d'évolution de l'efficacité énergétique dans l'industrie sont relativement bien documentées, les projections sur les niveaux de production de l'industrie française sont plus hasardeuses.

L'ADEME a donc souhaité se doter d'un outil de modélisation des niveaux de production industrielle tenant compte de l'évolution des marchés associés à la TEE au travers de la demande en matériaux des 9 industries grandes consommatrices d'énergie que sont l'acier, l'aluminium, le clinker, le verre, le dichlore, l'ammoniac, l'éthylène, les papiers et cartons et le sucre. Cet outil permet ainsi de modéliser une trajectoire de production de ces 9 matériaux en France sur la base d'hypothèses liées aux évolutions de la demande en matériaux des différents secteurs débouchés. L'année de référence considérée pour ces trajectoires correspond à l'année 2014. Pour cette année de référence, les flux de matériaux bruts et des biens de consommations et d'équipement produits à partir de ces matériaux sont représentés sous forme matricielle. Cette première cartographie intègre les importations et exportations et donc aussi bien les consommations (la demande) que les productions. Ensuite, à partir de ce point de référence, moyennant la formulation d'hypothèses concernant l'évolution de la demande des consommateurs, de la réutilisation et réparation éventuelle de certains produits, des améliorations technologiques du bilan matière, du taux d'incorporation de matière recyclée dans la fabrication et de l'évolution des échanges internationaux, il est possible de définir des trajectoires de production pour les 9 matériaux étudiés.

L'ensemble de ce travail est capitalisé dans un outil. Ce rapport décrit cet outil, la cartographie des flux pour l'année de référence et propose des éléments prospectifs en vue d'identifier les déterminants essentiels à l'évolution de la production des différents matériaux. A ce stade de réflexion, les considérations prospectives formulées dans ce rapport ont pour objet de susciter les échanges entre les différentes parties prenantes et l'ADEME et ne présument en rien des hypothèses qui seront retenues ultérieurement dans le cadre de l'élaboration de nouveaux scénario prospectifs.



www.ademe.fr

