

Mai 2019

Relocaliser la filière bois française : une bonne idée pour le climat

Gabriella **Cevallos** | Julia **Grimault** (I4CE)

Valentin **Bellassen** (INRA)

RÉSUMÉ

Faut-il relocaliser la filière bois ? Quel serait l'impact d'une transformation locale du bois, en utilisant les résidus de cette transformation pour produire du bois industrie ou bois-énergie par exemple ?

Alors que la filière forêt-bois est marquée par un déficit commercial structurel de 6 milliards d'euros, notamment lié à une exportation des produits bruts (grumes) et une importation des produits-bois semi-transformés et transformés (par exemple sciages et placages), un scénario de transformation locale des produits-bois permettrait d'allier intérêt économique et climatique. Se basant sur cette option déjà préconisée par plusieurs documents de politiques publiques, I4CE se propose d'apporter une première estimation chiffrée de l'impact d'un tel scénario du point de vue climatique.

L'intérêt climatique d'une telle option n'est pas évident. Car si un scénario de relocalisation conduit à une baisse du transport international de marchandise de la filière, et donc des émissions associées, il pourrait aussi diminuer les effets de substitution. A l'heure actuelle, la France importe beaucoup de produits transformés, et ce sont les pays exportateurs de ces produits qui bénéficient de l'utilisation des résidus de la transformation du bois brut, en partie pour produire de l'énergie ou des matériaux transformés (papier, cartons, panneaux, ...). Une évaluation des gains climatiques implique donc de prendre en compte l'impact sur les émissions des autres pays

Dans cette étude, l'Institut de l'économie pour le climat (I4CE) fait tout d'abord le point sur les échanges commerciaux de la filière bois française et sur les différents effets de substitution. Pour rappel et de manière simplifiée, l'effet de substitution

désigne les émissions évitées si un produit-bois est utilisé à la place d'un produit plus émetteur en termes de GES. Ainsi, I4CE estime qu'à l'heure actuelle, les produits-bois importés permettent d'éviter environ 5 MtCO₂. Si on s'intéresse aux exportations par la France, l'utilisation de produits-bois permet d'éviter l'émission de 7 MtCO₂ chez nos voisins. Cependant, près d'un cinquième de ces émissions évitées sont « réémises » par le transport international de ces produits-bois.

L'étude apporte ensuite des éléments chiffrés pour répondre à la question : est-ce une bonne idée pour le climat de relocaliser la filière bois française ? En exploitant les données commerciales de la filière, I4CE a développé différents scénarios de relocalisation du bois et évalué leur impact CO₂.

Il en ressort que, **même avec des hypothèses conservatrices, la relocalisation d'une partie des activités de la filière représente un gain pour le climat**. Si elle induit une hausse des émissions dans les autres pays, celles-ci sont globalement compensées par l'utilisation accrue de bois-énergie en France et – surtout – la réduction du transport international.

La relocalisation de la filière bois, associée à une bonne valorisation énergétique des résidus de transformation du bois, permettrait de disposer de plus de biomasse en France. Combien ? On estime dans cette étude que cela représenterait jusqu'à **16 % de l'objectif de mobilisation de la biomasse associé au prélèvement supplémentaire 12 Mm³/an prévu en 2026 par le Plan National Forêt-Bois**, ce qui permettrait de réduire un recours aux importations de produits énergétiques.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	2	CONCLUSION	23
I. LES COMPTABILITÉS CARBONE DES PRODUITS LIGNEUX	3	BIBLIOGRAPHIE	24
A. L'inventaire national et l'empreinte carbone en France	3	ANNEXES	26
B. Les déterminants de l'empreinte carbone des produits-bois	3	Annexe A - Méthodes	26
<i>Analyse de cycle de vie et coefficient de substitution</i>	3	<i>Allocation de l'usage économique des ressources forestières pour la reconstitution des flux de la filière et les scénarios</i>	26
<i>Les principales sources d'émissions des produits-bois</i>	4	<i>Gestion de la fin de vie</i>	26
<i>Choix méthodologiques influençant l'ACV des produits-bois</i>	5	<i>Coefficients de substitution</i>	26
		<i>Les modalités de transport des produits-bois</i>	27
II. LA FILIÈRE FORÊT-BOIS FRANÇAISE ET LES FLUX D'ÉCHANGES COMMERCIAUX	6	Annexe B - Réconciliation des flux de matières à partir de faostat et facteurs de conversion	29
A. Production et consommation de bois en France : le poids croissant du bois-énergie	6	Annexe C - Analyse de sensibilité du coefficient de substitution-énergie	31
B. Les évolutions des flux commerciaux de la filière forêt-bois française	7	Annexe D - Diagramme de la filière bois pour les différents scénarios	31
<i>Bilan global des échanges commerciaux de bois</i>	9		
<i>Evolution par grandes catégories de produits</i>	9		
<i>Principaux partenaires commerciaux de la France pour les produits-bois (2011-2016)</i>	12		
III. EXPORTATION ET IMPORTATION DES PRODUITS LIGNEUX : QUEL IMPACT SUR LE BILAN CARBONE DE LA FILIÈRE ?	13		
A. Contribution des importations et exportations françaises des produits bois	13		
B. Les émissions des échanges commerciaux de la filière bois au sein des indicateurs climatiques nationaux	15		
C. Quels scénarios pour une transformation locale du bois ?	16		
<i>Quatre scénarios impliquant une politique de transformation locale du bois en France</i>	16		
<i>Scénarios « Réduction des échanges » et « Transformation locale et export » : le poids significatif du commerce international</i>	18		
<i>Scénario « Transformation locale et consommation locale » et « Transformation locale et bois-énergie » : une amélioration de l'inventaire français au détriment d'un effet substitution énergie moindre dans le reste des pays</i>	19		
D. Méthode	22		
<i>Substitution énergie</i>	22		

Introduction

La forêt française joue un rôle dans l'atteinte de la neutralité carbone à l'horizon 2050 pour la France, à travers sa fonction de puits carbone d'une part, mais aussi via la production de produits-bois qui peuvent participer à la décarbonation de certains secteurs économiques. Les effets de substitution désignent ainsi les réductions d'émissions procurées par une consommation de produits-bois, dès lors qu'ils sont utilisés comme alternative à des produits non-bois. La substitution est positive lorsque le produit non-bois est plus émetteur en gaz à effet de serre (GES) que le produit-bois. Bien évidemment, les effets de substitution ont un impact sur le puits de carbone forestier à travers le niveau de récolte nécessaire pour la fabrication des produits-bois (Valade *et al.*, 2017). Cependant, la quantification de cette substitution ne prend généralement pas en compte les échanges commerciaux. Or, si la France constitue en Europe la quatrième forêt en superficie, le solde commercial de la filière est structurellement déficitaire de près de 6 milliards

d'euros et représente le second poste de déficit de la balance commerciale nationale (Franqueville, 2015 ; Alexandre, 2017). En parallèle de la multiplication des incitations à mobiliser du bois pour l'énergie au niveau européen et national, se pose la question de la provenance de ce bois et des émissions qui y sont associées. Le poids des échanges commerciaux au sein de la filière bois française interroge avec acuité, tant d'un point de vue économique que climatique, la pertinence d'un scénario de transformation locale des produits-bois.

C'est pour répondre à cette question que la présente étude s'attache à (1) revenir sur **les principaux déterminants de l'effet de substitution des produits-bois** et (2) réaliser **un état des lieux des échanges commerciaux des produits-bois** afin de (3) proposer **une estimation des effets de substitution associés aux échanges actuels** et (4) explorer **différents scénarios théoriques impliquant une transformation locale des produits-bois**.

I. Les comptabilités carbone des produits ligneux

A. L'inventaire national et l'empreinte carbone en France

L'élaboration d'un inventaire national des émissions anthropiques naît de la nécessité de disposer d'outils de mesure de la contribution de chaque pays aux émissions de gaz à effet de serre. La comptabilisation des émissions au sein des inventaires nationaux est normée par la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), et prend en compte uniquement les émissions liées à la production nationale à l'intérieur des frontières d'un pays. L'un des enjeux de l'inventaire réside dans l'amélioration du suivi des émissions et donc de l'efficacité des politiques de lutte contre le changement climatique. On sait ainsi qu'entre 1990 et 2014, les émissions de GES (hors secteur des terres) de l'Union Européenne et de la France ont respectivement diminué de 16 % et 24 % (CGDD-SOeS, 2017). Le secteur forestier était en 2015 un puits net de carbone à hauteur de 60 MtCO₂éq par an, représentant 13 % des émissions de l'inventaire national hors secteur des terres (CITEPA, 2018).

La limite d'une approche « inventaire » est de mettre de côté les émissions associées au commerce international, par exemple l'importation de biens destinée à la consommation finale des ménages ou à la consommation intermédiaire des entreprises. Pour la filière forêt-bois, cela se traduit par deux défauts quand il s'agit de suivre les politiques climatiques. Le premier concerne l'effet de l'usage des produits-bois sur les émissions des autres secteurs (effets de substitution), qui est visible mais hors du secteur forêt-bois. La seconde est l'absence de prise en compte des émissions liées au transport international du bois et aux émissions évitées par l'usage du bois français dans d'autres pays. Ainsi, tous secteurs confondus, Peters *et al.*, (2011) montrent qu'entre 1990 et 2008, un tiers des émissions mondiales sont associées à la production de biens et services hors des frontières des pays où ils sont finalement consommés. Certains pays, dont la France, se trouvent en situation d'importateur d'émissions. Depuis 1995, les émissions importées ont augmenté de 91 % justifiant son utilisation en tant qu'indicateur dans la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) (Baude, 2018). Pour l'année 2012, les émissions associées aux importations de biens et services représentaient 52 % de l'empreinte carbone nationale. 62 % de ces émissions importées alimentent les consommations intermédiaires des entreprises françaises.

Les produits ligneux présentent deux spécificités par rapport aux autres produits échangés : ils stockent du carbone et leur emploi permet d'éviter des émissions quand ces produits se substituent à des alternatives plus émettrices de GES. Le calcul du stock de carbone associé aux produits-bois est désormais obligatoire et normé dans le cadre des inventaires

nationaux. Le stockage de ce compartiment est modeste : 2,2 MtCO₂éq en 2014 suivant l'approche « production » retenue par la CCNUCC pour les inventaires, soit 4 % du stockage en forêt cette année-là. Ainsi l'effet de substitution est généralement nettement supérieur à l'effet de stockage des produits-bois (Valade *et al.*, 2017 ; Fortin *et al.*, 2012).

Côté substitution, deux grandes catégories se distinguent, la substitution « matériau » où le produit-bois remplace un matériau parfois plus émetteur de carbone et la substitution « énergie », où le bois remplace une autre source d'énergie, parfois fossile. Ce mécanisme d'atténuation ne prend sens que dans le cadre d'une comparaison avec un scénario de référence, en termes de recours aux différents types de matériaux ou d'énergies. L'avantage climatique procuré provient des émissions GES « évitées » et dépend donc à la fois de l'empreinte carbone des produits ligneux et de celles des produits qu'ils substituent.

Comparé à un scénario où l'on n'utiliserait aucun produit-bois, l'effet de substitution a été évalué en France à 42 MtCO₂éq/an, dont 9 MtCO₂éq/an grâce à la substitution-énergie (Roux A *et al.*, 2017). Cette estimation d'un effet de substitution sur l'ensemble de la production nationale suppose toutefois de le comparer à un scénario de référence sans production de bois et donc un surcroît de séquestration en forêt conséquent qui doit être comparé à ces 42 MtCO₂éq/an pour obtenir un bilan total de la substitution.

B. Les déterminants de l'empreinte carbone des produits-bois

Analyse de cycle de vie et coefficient de substitution

L'analyse de Cycle de Vie (ACV) telle que définie par l'ISO 14040 est une « compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie ». L'intérêt d'une telle approche multi-étapes et multi-impacts est la prise en compte de l'ensemble des étapes nécessaires à la fabrication d'un produit-bois, de la gestion sylvicole jusqu'à sa fin de vie (Figure 1).

FIGURE 1. PRINCIPALES ETAPES DU CYCLE DE VIE D'UN PRODUIT-BOIS



Source : FCBA (2012)

A la différence des inventaires nationaux de GES, les ACV ne prennent pas en compte les stocks de carbone biogénique en forêt ou dans les produits (Deroubaix, Vial, et Cornillier, 2012). Les émissions de carbone biogéniques sont en générale ignorées car considérées comme renouvelables. Leur omission est plutôt « favorable à la filière » : le déstockage en forêt est en général plus important et plus durable que le stockage dans les produits (Agostini, Giuntoli, et Boulamanti, 2013). Malgré cette limite, l'ACV permet de comparer avec des alternatives non-bois et est utilisée, *in fine*, pour établir des coefficients de substitution.

Le calcul d'un coefficient de substitution exprimé en $tCO_2\text{éq} / tCO_2\text{éq}$ se calcule de la manière suivante :

$$\text{Coefficient de substitution} = \frac{GES_{\text{non-bois}} - GES_{\text{bois}}}{\text{Quantité bois}_{\text{bois}} - \text{Quantité bois}_{\text{non-bois}}}$$

où :

GES_{produit} sont les émissions liées à la fabrication du produit (*bois* ou *non-bois*) en $tCO_2\text{éq}$;

$\text{Quantité bois}_{\text{produit}}$ est la quantité de bois présente dans le produit (exprimée en $tCO_2\text{éq}$ contenu dans le bois).

Notons que $\text{Quantité bois}_{\text{non-bois}}$ peut différer de zéro, par exemple si la référence est un bâtiment en béton qui inclut un châssis de fenêtre en bois (Sathre and O'Connor, 2010).

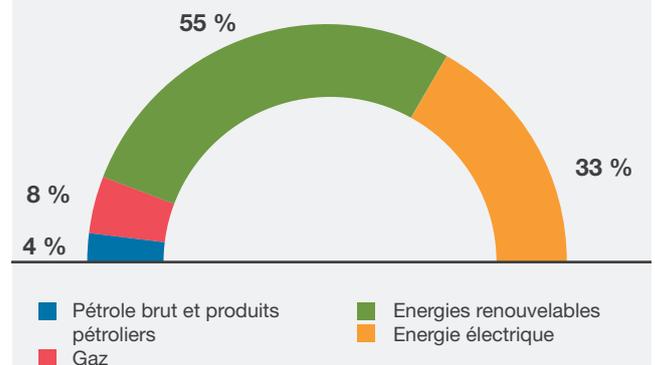
Source : (Valade et al., 2017)

La valeur du coefficient de substitution varie selon un éventail de paramètres que nous séparerons en trois catégories : ceux qui découlent des choix méthodologiques liés à l'ACV, ceux liés aux procédés technologiques lors des étapes de fabrication des produits ligneux et ceux associés à l'élaboration d'un scénario de référence.

Les principales sources d'émissions des produits-bois

L'énergie mobilisée pour la transformation des produits-bois ne représente par le poste d'émissions GES le plus important. En effet, l'énergie finale utilisée pour la production d'une grande partie des produits-bois est largement décarbonée, avec 55 % d'énergies renouvelables¹ et 33 % d'énergie électrique (largement décarbonée via l'énergie nucléaire) pour première transformation du bois (Figure 2).

FIGURE 2. ENERGIE FINALE CONSOMMEE EN FRANCE EN 2016 PAR LE SECTEUR « BOIS ET DERIVES »* (NACE 2)



Source : Eurostat

* Selon la nomenclature NACE Rev.2, le secteur « bois et dérivés » comprend : placage, panneaux de bois, parquets assemblés, charpentes, emballages en bois et objets divers en bois.

Certains facteurs sont identifiés comme permettant d'optimiser les avantages climatiques procurés par l'effet de substitution. On peut citer le niveau de valorisation des connexes lors de certaines étapes de transformation ou la gestion de fin de vie du produit (Bergman et al., 2014 ; Sathre and O'Connor, 2010). L'exploration de différents scénarios de valorisation du bois en fin de vie indique que les émissions évitées sont optimales lorsque la totalité du bois matériau permet en fin de vie la production d'énergie en substitution du charbon ou du gaz naturel. La valeur de référence pour la gestion de fin de vie aux Etats-Unis d'une charpente ou d'un parquet prévoit un taux de réutilisation de 30 %, qui permet de « rembourser » 53 % et 75 % de l'énergie nécessaire à la

¹ La catégorie « énergie renouvelable » comprend la valorisation des connexes en bois-énergie.

fabrication d'une charpente ou d'un parquet respectivement (R.D. Bergman *et al.*, 2013).

Systématiquement écarté des ACV, le bilan carbone de la forêt où l'on récolte le bois est pourtant déterminant (Valade *et al.*, 2017). Si ce poste est parfois pris en compte dans les études de scénarios de gestion forestière, le choix de la dynamique forestière dans le scénario de référence utilisé par l'ACV est souvent implicite et peine à prendre en compte l'incertitude inhérente à l'évolution du puits forestier dans un climat changeant (Bellassen and Luysaert, 2014).

Le transport ne fait pas figure de poste d'émission conséquent si la ressource ligneuse utilisée provient du territoire national. En Norvège, les émissions liées au transport intra-national du bois-énergie font fluctuer entre 1 % et 4 % le volume des émissions évitées par l'utilisation de bois-énergie (Petersen Raymer, 2006). L'ACV « cradle-to-gate » (de l'exploitation forestière à la scierie) de bois matériaux (panneau, sciage, placage) dans différents sites aux Etats-Unis porte également le transport à environ 4 % de l'énergie nécessaire à la production des produits-bois (Lippke *et al.*, 2012 ; Puettmann and Wilson, 2005).

Le transport international peut toutefois venir représenter un poste d'émissions conséquent dans l'utilisation des produits-bois : en Isère (France), la comparaison entre une récolte locale et une grume importée désigne le transport comme la principale source d'émission (Association des communes forestières de l'Isère, 2011).

Choix méthodologiques influençant l'ACV des produits-bois

Quatre principaux choix méthodologiques jouent fortement sur le résultat de l'ACV d'un produit-bois : le périmètre, la technologie de transformation et les pertes associées, le scénario de référence et l'allocation de l'empreinte carbone aux différents co-produits. Les frontières du système influencent fortement le résultat : certains postes d'émissions comme la forêt ou la fin de vie sont parfois exclus du périmètre de l'ACV réalisée.

La part de pertes lors des différentes étapes de transformation (récolte, sciage, seconde transformation) pèse fortement sur les résultats d'une ACV. Cette part est principalement liée aux technologies en place comme le triage mécanique du bois en scierie. A large échelle, le manque de données sur le déploiement des technologies représente donc un défi important. Les caractéristiques intrinsèques à l'essence telle que le taux d'humidité et sa densité ont également une influence significative (Ramage *et al.*, 2017).

Les hypothèses sous-jacentes au scénario de référence vont être primordiales dans l'élaboration du coefficient de substitution, par exemple le choix de la source d'énergie alternative. Une comparaison du bois-énergie avec le charbon sera logiquement plus favorable au bois qu'une comparaison avec le gaz ou une énergie renouvelable. A ce niveau il est important de mentionner que la comparabilité des scénarios implique que les mêmes étapes pour les produits-bois et leurs substituts sont pris en compte (extraction, transport, transformation, distribution).

Enfin, lorsqu'une même source d'émission comme le débardage intervient en amont de la fabrication de plusieurs produits comme des poutres et du combustible, elle doit être allouée aux différents produits. Plusieurs possibilités existent : l'allocation matière, au prorata du poids des coproduits, l'allocation énergétique, au prorata de la quantité d'énergie contenue par chaque produit, et l'allocation économique, au prorata de la valeur des coproduits. Si l'allocation économique est la plus logique et la plus pratiquée (Van Der Werf and Nguyen, 2015), elle n'est toutefois pas la méthode la plus mise en avant dans les lignes directrices des ACV (JRC, 2010).

II. La filière forêt-bois française et les flux d'échanges commerciaux

A. Production et consommation de bois en France : le poids croissant du bois-énergie

La forêt française occupe 16,4 millions d'hectares avec un volume de bois fort tige évalué à 2,7 milliards de mètres cubes. Les taux de prélèvement calculés par l'IGN sont utilisés comme indicateurs de durabilité des pratiques et s'élèvent à 45,2 Mm³ de bois fort tige soit 50 % de l'accroissement biologique (IGN, 2017), ce qui indique que la forêt pousse en ce moment deux fois plus vite qu'elle n'est coupée ce qui représente 50 % de l'accroissement (IGN, 2017).

Entre 2010 et 2016², le volume total commercialisé reste constant (autour de 37 Mm³) (Figure 3). Toutefois, on observe une valorisation croissante du bois en énergie, principalement au détriment du bois industrie. La part destinée à un usage énergétique (hors bois de chauffage autoconsommé) a presque doublé pour atteindre 22 % de la récolte en 2016. C'est le résultat de l'instauration de soutiens actifs de différentes politiques à l'échelle nationale et européenne en faveur d'une valorisation énergétique (Baron, Bellassen, et Deheza, 2013 ; Deheza, Bellassen, et N'Goran, 2014). La présence de divers freins (juridiques, institutionnels, technico-économiques ou socio-politiques) pour restructurer l'aval de la filière et d'un besoin d'investissement dans les procédés de transformation

participe à l'alimentation d'un scénario où « seul le lampadaire énergétique est allumé » (Alexandre, 2017).

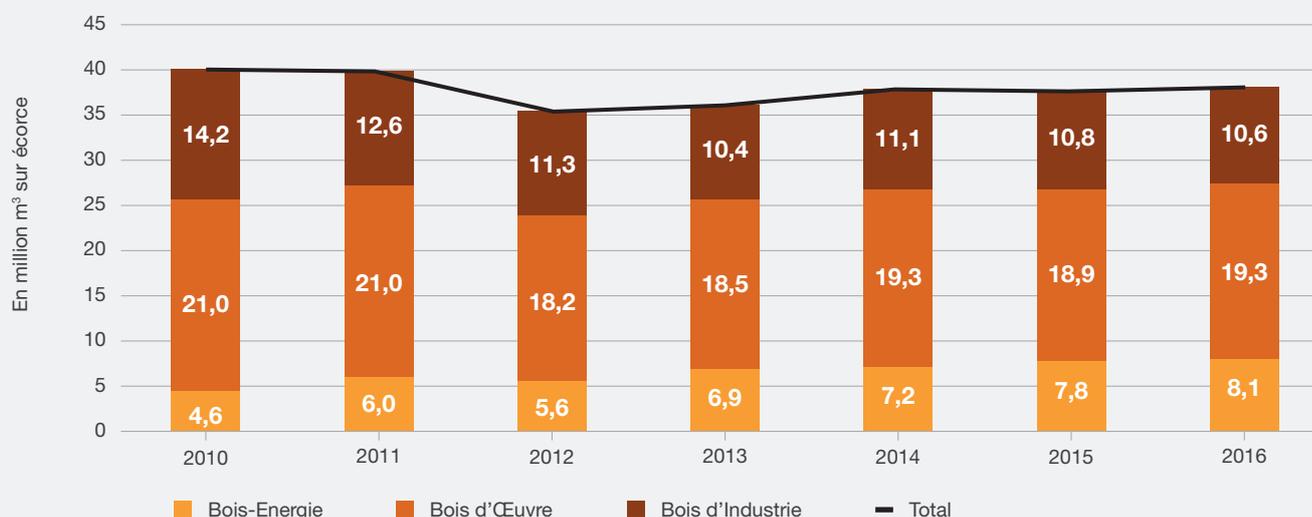
Pour disposer de données cohérentes avec les flux internationaux, nous recomposons les flux nationaux sur la base des données FAOSTAT (4) pour les ressources brutes (grumes de sciages, bois de trituration) et semi-transformées (sciage, panneaux, connexes). Les volumes obtenus sont cohérents avec ceux figurant dans d'autres diagrammes de flux de la filière bois issus de statistiques nationales (Agreste, 2017 ; Valade *et al.*, 2017). Dans la Figure 4, les rendements liés aux différents processus industriels sont renseignés à partir de moyennes observées au niveau national.

Rien que durant la première transformation du bois (d'une grume à un sciage), la moitié d'un mètre cube de grume finira en connexe. Ces connexes seront soit valorisés directement en énergie (pour 13 %), soit dirigés vers la filière bois industrie comme matière première des panneaux et de l'industrie papetière ou également valorisés en énergie (environ 39 %). Par exemple au sein de la filière bois industrie, environ 8,8 Mm³ des connexes affectés sont valorisés en bois-énergie.

A contrario on peut signaler que 48 % des connexes ne sont ni valorisés en bois-énergie ni en bois-industrie ; ces connexes présentent des débouchés aussi divers que terreau, isolant, paillage, carbonisation... Cette répartition des usages des connexes est celle renseignée par le service de la statistique et de la prospective (SSP) du Ministère de

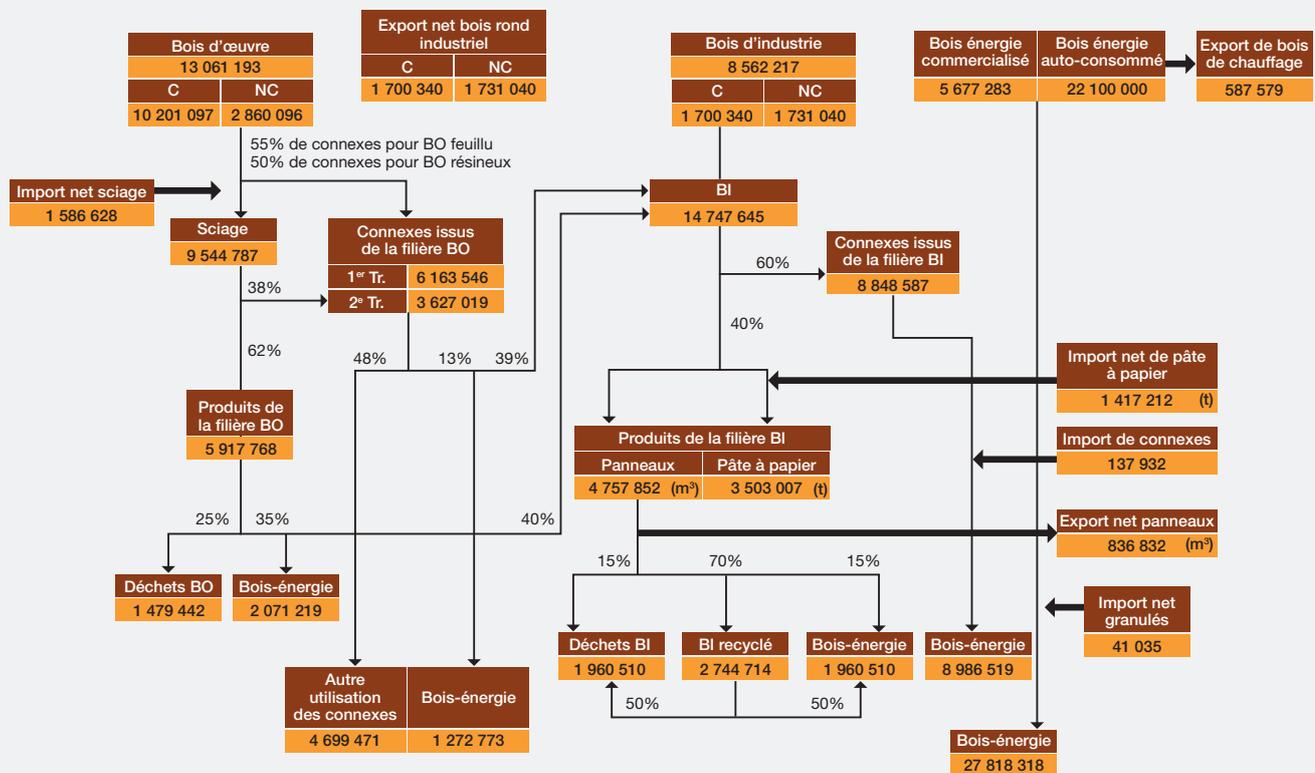
2 Période sur laquelle se baseront les scénarios dans la partie III.

FIGURE 3. VOLUME DE BOIS COMMERCIALISÉ EN FRANCE (2010-2016), SELON LEUR USAGE ÉCONOMIQUE



Source : Données Agreste-EAB

FIGURE 4. DIAGRAMME DES FLUX DE LA FILIÈRE FORÊT-BOIS ET LA PRODUCTION DE CONNEXES (2011-2016)



Source : Coefficients de transformation tirés de (Valade & al., 2017) et volumes selon faostat*

* Des estimations plus précises seront disponibles à travers a veille économique mutualisée, dont les résultats seront publiés vers la fin de l'année.

l'Agriculture³ (Agreste primeur, 2014). Soulignons que selon certains acteurs de la filière, le taux de connexes utilisé en bois-énergie serait beaucoup plus élevé et avoisinerait, *in fine*, les 90 %.

Au final, dans la Figure 4, la valorisation énergétique de l'ensemble des connexes⁴ permise par une utilisation en cascade des produits et une articulation des usages entre les différentes filières (BO, BI et BE), représente 40 % du volume total de la matière commercialisée annuellement. **La valorisation énergétique des connexes** issus à la fois de la transformation du bois et d'une valorisation en fin de vie des produits-bois, **représente un levier considérable pour diminuer les émissions de GES** nationales mais aussi de la filière.

3 Annuellement, une enquête sur le volume de production des différentes catégories de produits-bois est menée auprès des entreprises françaises présentant une activité d'exploitation forestière ou d'activité de sciage. En 2018, plus de 5000 entreprises ont été interrogés.

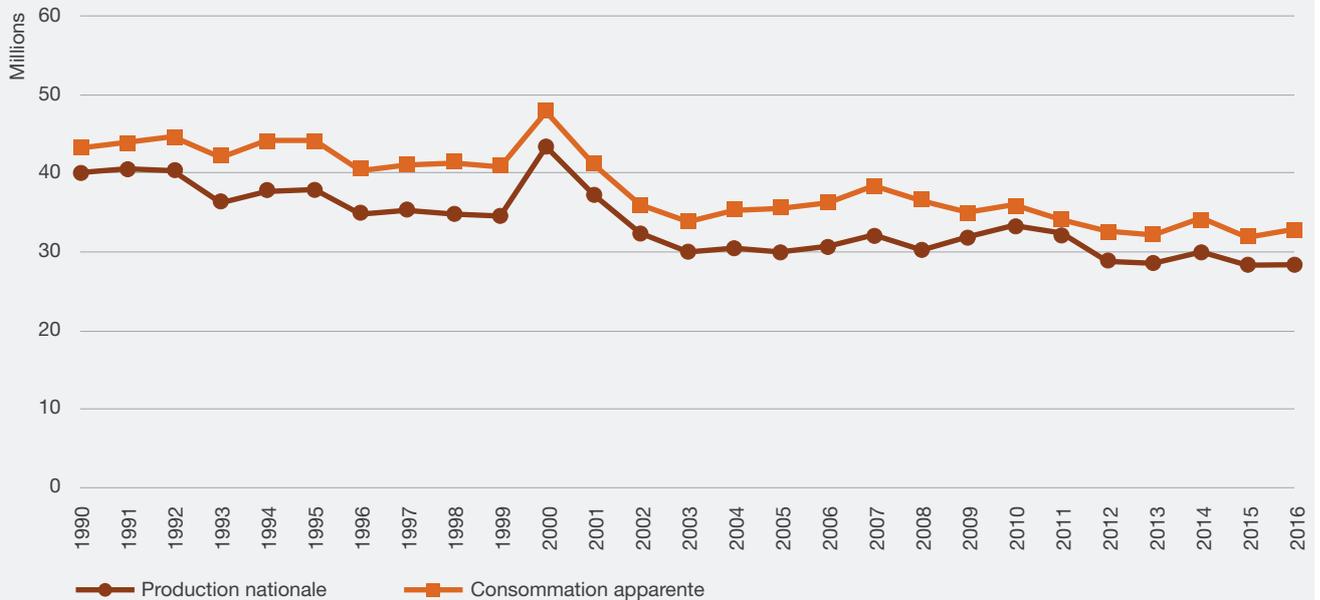
4 On englobe les connexes provenant de BO /BI et valorisés en bois-énergie en fin de vie mais aussi les granulés et plaquettes de bois utilisés à des fins de combustibles et comptabilisés dans la catégorie « bois-énergie commercialisé ».

B. Les évolutions des flux commerciaux de la filière forêt-bois française

La base de données de la FAO retrace les flux de produits bruts ou semi-transformés et ne permet pas de tracer les produits-bois finis (notamment papiers et cartons transformés et meubles en bois). Il existe également une inconnue quant à la destination finale des produits, illustrée par l'exportation des grumes de feuillus (Annexe C). Ainsi, une partie des grumes françaises qui transite par le port d'Anvers pour aller en Chine est recensée à destination de la Belgique. (Franqueville, 2015) souligne également l'imprécision des déclarations douanières à propos des flux entrants et sortants, notamment dans le secteur des produits-bois. Toutefois, les données mises à disposition par FAOSTAT restent une référence utilisée par de nombreuses études dans le domaine.

II. LA FILIÈRE FORÊT-BOIS FRANÇAISE ET LES FLUX D'ÉCHANGES COMMERCIAUX

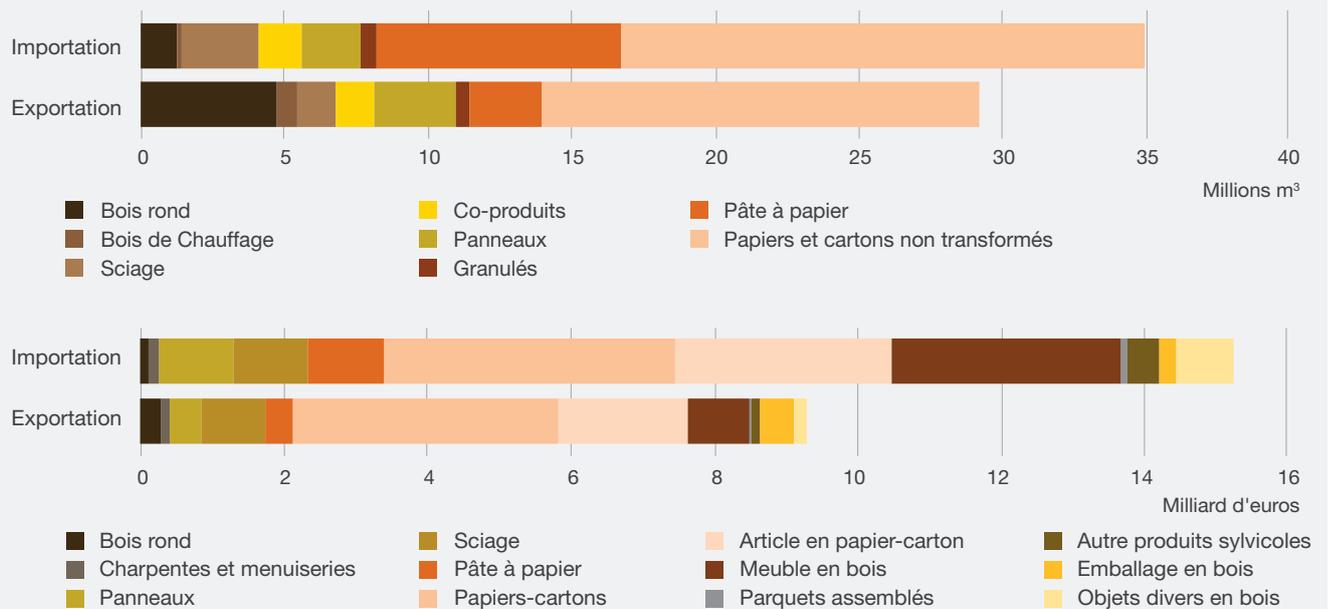
FIGURE 5. PRODUCTION NATIONALE ET CONSOMMATION APPARENTE* AU SEIN DE LA FILIÈRE BOIS FRANÇAIS (1990-2016)



Source : A partir de Faostat

* Le périmètre des produits pris en compte est celui proposé par faostat, c'est-à-dire de la grume aux produits semi-transformés (panneaux, pâtes à papier, sciages). Le volume de bois-énergie considéré prend en compte à la fois le bois auto-consommé et commercialisé.

FIGURE 6. STRUCTURE EN VOLUME (EN HAUT) ET EN VALEUR (EN BAS) DES IMPORTATIONS ET EXPORTATIONS DE LA FILIÈRE FORÊT-BOIS FRANÇAISE (2016)



Source : A partir des données de Faostat et FCBA.

Bilan global des échanges commerciaux de bois

La comparaison de la production nationale et de la consommation nette apparente⁵ met en avant le degré de dépendance d'une partie de la demande intérieure à un approvisionnement en commodités provenant de l'extérieur. La production nationale et la consommation apparente de bois depuis 1990 sont en constante baisse, passant respectivement de 40 Mm³ et 43 Mm³ en 1990 à 28 Mm³ et 33 Mm³ en 2016.

En 2016, le déficit commercial de l'ensemble de la filière s'élève à 5,9 milliards d'euros et s'accroît de 6 % en 2017 par rapport à 2016 (Agreste conjoncture, 2018). Cela représente le second poste de déficit de la balance commerciale française (Alexandre, 2017). L'analyse en volume des échanges commerciaux (Figure 6) pointe que le volume des produits importés est supérieur d'un montant de 2,8 Mm³ aux exportations. Le principal sous-secteur excédentaire net est le bois rond. Les sous-secteurs déficitaires nets de plus d'un million de mètres cubes sont la pâte à papier, les panneaux, et les sciages.

En 2016, la structure en valeur des échanges commerciaux indique que le déficit de la balance commerciale est de l'ordre de 5,9 milliards d'euros pour l'ensemble de la filière bois. Cette situation est alimentée par une hausse annuelle des importations dans des secteurs présentant une forte valeur ajoutée comme la pâte, les papiers, cartons⁶ et les meubles en bois, avec une augmentation en 2017 de respectivement 5,2 % et 5,5 % par rapport à 2016 (Figure 6 et Agreste conjoncture, 2018). Par ailleurs, ces secteurs représentent en valeur respectivement 56,8 % et 16,6 % des échanges commerciaux de la filière.

Cela illustre le paradoxe souvent souligné à propos de la filière bois française qui dispose d'une ressource forestière abondante mais qui présente une balance commerciale structurellement déficitaire depuis les années 2000 (Levet *et al.*, 2014a).

Une comparaison menée parmi les principaux pays exportateurs de bois démontre que le niveau de production de grumes, donc le taux de prélèvement, est l'une des variables expliquant l'état de la balance commerciale du secteur papetier et de l'ameublement. Toutefois l'état des échanges commerciaux des produits mécaniques du bois majoritairement utilisés par le secteur de la construction (sciage, lamellé-collé, panneaux, emballage et charpentes)

dépend du niveau de productivité et de la performance technologique des industries du panneau et des scieries. De nombreux autres facteurs entrent donc en jeu, que ce soit en relation avec l'existence de freins de différentes natures en amont de la filière (juridiques, institutionnels, socio-politique etc. (Alexandre, 2017) ; une faible structuration du tissu de transformation et un besoin d'investissement dans certains processus industriels (séchage ou classement mécanique des bois) (Levet, Guinard, et Purohoo, 2014) ou une évolution nécessaire de la culture de consommation du bois pour valoriser des essences composant la forêt française mais trouvant des débouchés moindres. En d'autres termes, améliorer l'état de l'offre intérieure de la filière bois ne passe pas uniquement par l'augmentation du taux de prélèvement mais également par des politiques d'amélioration de la productivité des maillons de transformation intermédiaires, et suppose un investissement en faveur de cette transition. (Koebel *et al.*, 2016).

Evolution par grandes catégories de produits

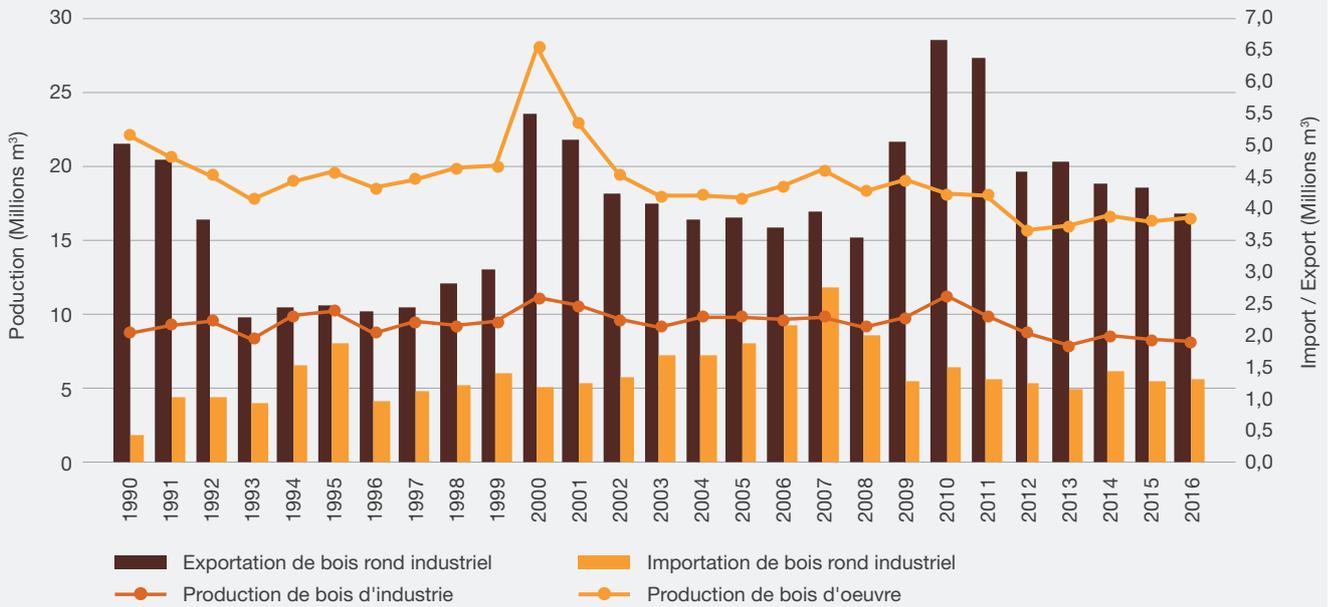
La production de bois d'industrie est constante sur la période 1990-2005 tandis qu'elle diminue en volume de 7 % entre 2005-2016. Hors tempête de 1999, la production de bois d'œuvre diminue entre 1990 et 2016 (Figure 7). La catégorie « bois industriel » regroupe à la fois les grumes de sciage et placage (BO) et le bois de trituration (BI), car les nomenclatures douanières de nombreux pays ne font pas de distinction selon l'utilisation économique finale du bois rond. La France est largement exportatrice nette de bois rond industriel. Entre 1990 et 2008, la part de bois rond exporté représente entre 9 % et 16 % du volume de production annuel de BO et BI. A partir de 2009, la part de grumes destinée à l'étranger évolue entre 17 % et 23 %.

La stabilité du volume prélevé de bois de chauffage qui inclut à la fois le volume commercialisé et celui autoconsommé par les ménages est à relativiser étant donné le niveau d'incertitude et la faible fréquence de collecte des données sur la consommation par les ménages (Agreste, 2017 ; Pouet and Gauthier, 2013). On peut néanmoins souligner l'augmentation du volume de bois de chauffage exporté aboutissant à faire de la France en 2016, le 5^e pays exportateur de bois de chauffage avec 2 % du volume de produits-bois commercialisé en France tous bois confondus et 7.5 % des exportations mondiales du bois de chauffage (FAO, 2018). Toutefois les volumes de ces échanges commerciaux restent faibles par rapport aux autres catégories (moins de 1 Mm³).

⁵ La consommation nette apparente est définie de la manière suivante : consommation apparente = production + importation - exportation (FAO, 2018). On prend en compte la production et consommation de grumes dirigés vers le bois d'œuvre, bois d'industrie et bois-énergie sans compter l'auto-consommation de bois de chauffage.

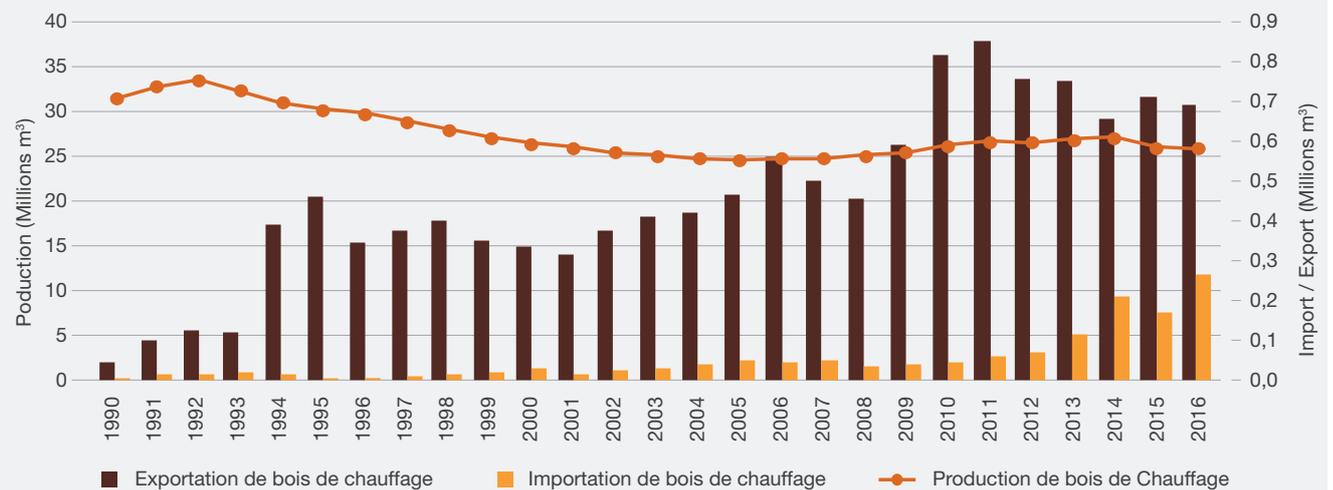
⁶ Englobe les catégories « papiers-cartons » et « articles en papier carton » de la figure n°5. Par ailleurs une nomenclature plus précise des produits-bois finis est en cours de développement par la filière, notamment à travers la Veille Economique Mutualisée.

FIGURE 7. PRODUCTION ET ECHANGE COMMERCIAL DU BOIS D'ŒUVRE ET BOIS D'INDUSTRIE (1990-2016)



Source : I4CE, à partir de Faostat

FIGURE 8. PRODUCTION, COMMERCIALISATION ET ECHANGE COMMERCIAL DU BOIS DE CHAUFFAGE (1990-2016)

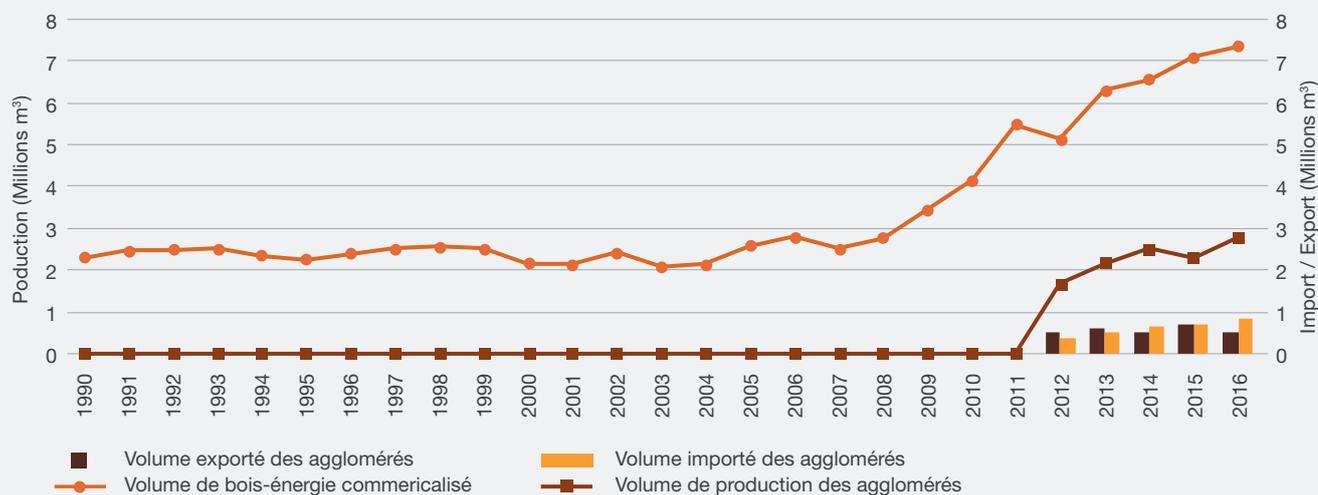


Source : I4CE, à partir de Faostat

Au sein du bois-énergie commercialisé (Figure 9), le bois de chauffage constitue la totalité du volume jusqu'en 2010, date à laquelle la catégorie statistique des agglomérés (granulés) fait son apparition. Malgré un essor important de la production, le commerce international sur cette catégorie demeure inférieur à 0,7 Mm³/an et le solde net en volume entre exportation et importation est quasiment à l'équilibre (-41 035 m³) pour

la période 2011-2016. A défaut de disposer de statistiques sur l'origine des granulés importés, on peut conclure que **la part de la consommation intérieure dépendante des importations est minime, particulièrement quand on la compare aux volumes échangés dans d'autres catégories de produits-bois.**

FIGURE 9. PRODUCTION ET ECHANGES COMMERCIAUX DU BOIS-ENERGIE ET DES AGGLOMERES EN FRANCE (1990-2016)



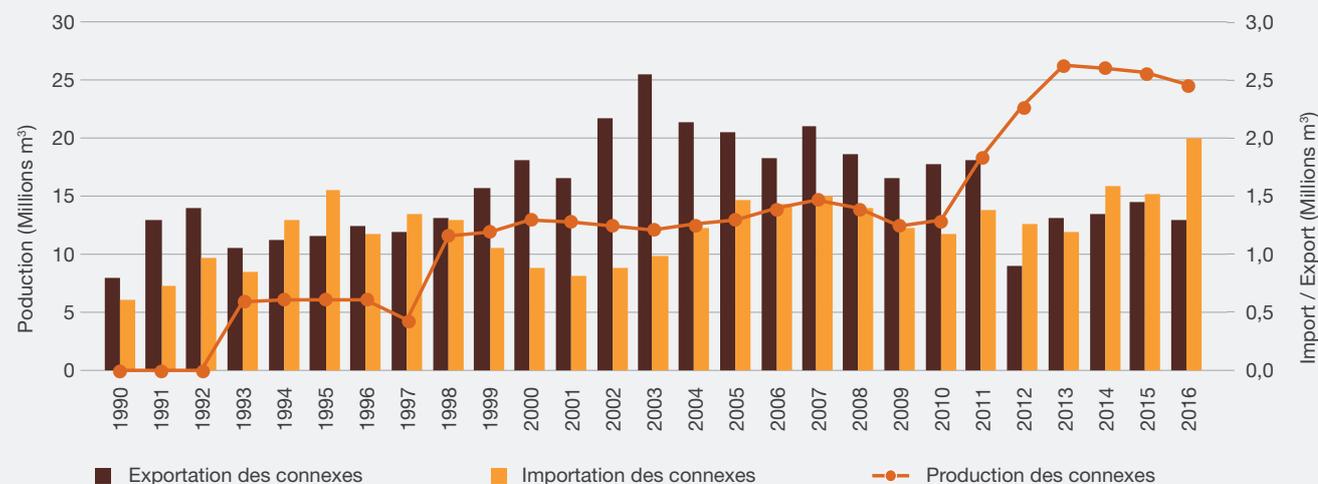
Source : I4CE, à partir de Agreste pour le bois-énergie commercialisé et FAO stat pour les autres catégories

Les co-produits du bois, ou produits connexes, viennent quant à eux alimenter la filière papetière, la production de panneaux de particules ou la valorisation énergétique à travers une transformation en produits agglomérés. Les variations interannuelles sont importantes, en particulier pour la balance commerciale (Figure 10). Globalement excédentaire jusqu'à la fin des années 2000, la balance commerciale des

co-produits devient déficitaire à partir de 2009, alimentée par une valorisation croissante⁷ des co-produits en d'autres produits dérivés, notamment en bois-énergie (Figure 9).

⁷ L'augmentation de production des connexes au sein de faostat peut s'expliquer par l'introduction d'une nouvelle catégorie statistiques (« les agglomérés ») reflétant une valorisation commerciale croissante des connexes.

FIGURE 10. PRODUCTION ET ECHANGE COMMERCIAL DES CO-PRODUITS (1990-2016)



Source : I4CE, à partir de Faostat

Principaux partenaires commerciaux de la France pour les produits-bois (2011-2016)

L'identification des partenaires commerciaux pour chaque catégorie de produit s'opère en choisissant les pays avec lesquels la France a un volume total d'échange important et représentatif⁸ (Tableau 9). Concernant les exportations, la Belgique se positionne comme la première destination de bois rond conifère et feuillu, recevant respectivement un volume annuel moyen de 640 667 m³ (22 % du volume total exporté) et 981 000 m³ (soit 52 % du volume total exporté). On observe un phénomène de contraction des exportations vers la Chine en 2014 au profit de la Belgique, rendant visible le très probable transit par la Belgique à travers le port d'Anvers, d'une partie des grumes exportées vers la Chine (voir les graphiques en Annexe). Pour la suite de l'étude, nous faisons l'hypothèse que 80 % des produits enregistrés vers la Belgique sont en réalité consommés en Chine⁹. Le périmètre d'étude choisi ici va de la ressource brute au produit semi-transformé¹⁰. Au total les vingt partenaires commerciaux retenus représentent 85 % des importations et 83 % des exportations. Les échanges enregistrés depuis/vers la France sont intra-européens pour 78 % des importations et 55 % des exportations.

La filière forêt-bois est nettement exportatrice de grumes...

L'exportation de bois rond est en forte hausse sur la période 2011-2016 (e.g. +31 % pour le bois rond conifère). Pour le bois rond conifère, l'Italie et l'Allemagne rassemblent à eux deux 40 % du volume exporté. Se positionnent ensuite la Chine, l'Espagne et le Luxembourg avec respectivement 13 %, 11 % et 3 %. Pour le bois rond feuillu, c'est la Chine qui se positionne en seconde position captant en moyenne 19 % du volume exporté derrière la Belgique avec 52 %.

Le volume annuel moyen des importations de bois rond conifère qui s'élève 1,1 Mm³/an est largement supérieur à celui du bois rond feuillu qui est de 0,2 Mm³/an. Les importations de bois rond conifère proviennent pour 52 % de la Suisse et l'Espagne.

... mais nettement importatrice de sciages

Si la production des sciages a drastiquement diminué durant la dernière décennie (-22 % depuis 2005), la demande intérieure n'a décliné que légèrement puisque le volume d'importation nette sur la dernière période quinquennale est en moyenne de 1,6 Mm³/an.

Les destinations des sciages produits en France sont morcelées, l'Espagne et la Belgique recevant à eux deux 27 % du volume exporté à l'international qui est en moyenne de 1,08 Mm³/an. La Chine est le troisième partenaire, avec un volume annuel moyen de 78 876 m³. 2,7 Mm³/an de sciages sont importés, dont 39 % proviennent d'Allemagne ou de Finlande.

Une demande intérieure en connexes¹¹ croissante

Il existe une forte demande intérieure en connexes, menant à une balance commerciale négative ces dernières années (Figure 10). Près de 452 872 m³/an de plaquettes sont exportés principalement vers l'Allemagne, la Suisse et la Belgique qui reçoivent respectivement 32 %, 20 % et 18 % du volume total exporté pour cette catégorie. Les « plaquettes et particules » importées, qui constituent l'une des deux sous-catégories de faostat pour désigner les connexes, représentent un volume moyen de 551 036 Mm³/an en provenance d'Allemagne (43 %), de Belgique (20 %) et d'Espagne (31 %).

Une consommation des produits semi-transformés (panneaux et placage)¹² satisfaite pour moitié par des importations

Les échanges pour la catégorie des panneaux sont majoritairement intra-européen, et la consommation est satisfaite à 52 % par des importations. On peut signaler le cas particulier du placage et contre-placage qui représente un volume marginal de la consommation apparente (1,5 %) ; l'approvisionnement est actuellement entièrement couvert par des importations, provenant pour 52 % de la Chine, de Belgique et du Gabon.

8 Le groupe de pays désigné comme principaux partenaires commerciaux agrègent par catégorie de produit, entre 65 % et 98 % du volume échangé.

9 Il est possible qu'un biais similaire existe pour l'Allemagne et les Pays-Bas via le Rhin et la Meuse, mais il est probablement faible car les statistiques de commerce avec ces deux pays sont cohérentes avec leur taille.

10 Les catégorie « papiers et cartons » sont exclues.

11 Sur FAOSTAT, les destinations des importations et exportations ne sont indiquées que pour la catégorie « plaquette et résidus de bois » qui est une sous-catégorie des connexes. Le volume échangé indiqué ici n'est donc pas représentatif de l'ensemble des échanges internationaux des connexes. Cette remarque est également valable pour la catégorie « panneaux ».

12 Voir ci-dessus.

III. Exportation et importation des produits ligneux : quel impact sur le bilan carbone de la filière ?

Nous l'avons vu précédemment, il existe un argument économique à relocaliser la production de valeur ajoutée sur le territoire, en réduisant l'exportation de la ressource brute (bois ronds) et produits semi-finis (sciages) et l'importation de produits semi-transformés ou transformés. Néanmoins, qu'en est-il d'un point de vue des émissions de GES et de leurs impacts sur le climat ? **Dans un scénario de transformation et de consommation locale des produits**, quelle serait la **contribution de la filière bois (1)** aux objectifs de réduction des GES pour l'inventaire français et (2) à la décarbonation générale de l'économie ?

Le projet de Stratégie Nationale Bas Carbone publié en décembre 2018, décrit trois orientations permettant au secteur forêt-bois de contribuer à l'atteinte de la neutralité carbone de la France. La deuxième orientation stipule de maximiser l'effet de substitution, et notamment de renforcer l'efficacité carbone de l'usage des ressources bois (MTES, 2018). Cela se traduit la mise en avant de l'effet de substitution, notamment en valorisant des connexes issus de la transformation des produits-bois pour les filières bois-industrie et bois-énergie. En lien avec ces objectifs présents dans les différentes versions de la SNBC (MTES, 2018 ; MTES, 2015), cette étude se propose dans cette dernière partie d'apporter des éléments de réponse grâce à une estimation du gain climatique qu'apporterait une transformation locale des produits-bois et une estimation de la biomasse supplémentaire qui serait disponible.

Pour cela, dans un premier temps une estimation est donnée **émissions actuelles associées au commerce et transport internationaux des produits bois**. Une fois cette estimation de la situation actuelle réalisée, **quatre scénarios théoriques** sont explorés afin **d'évaluer les perspectives qu'offrent une situation de transformation locale des produits-bois**.

A. Contribution des importations et exportations françaises des produits bois

Afin de déterminer le bilan en émissions de GES de la situation actuelle, une première estimation est calculée de la contribution à l'effort climatique des produits-bois actuellement importés et exportés lorsque ceux-ci sont utilisés en matériau ou énergie. Les émissions liées au transport de ces produits sont également prises en compte. Les catégories de produits considérés ici sont les grumes, les connexes, les panneaux, les sciages, les produits-bois servant à des fins énergétique (bois de chauffage et agglomérés) et la pâte à papier¹³.

Le **coefficient de substitution énergie est calculé à partir du mix énergétique national de chaque pays (Figure 20)**, qui peut différer de l'utilisation effective du bois-énergie. Ce choix méthodologique s'explique par la volonté d'effectuer un exercice de comparaison d'usage des produits-bois dans différents pays.

Selon diverses études les énergies remplacées par du bois-énergie sont souvent le fioul ou le gaz (Bergman *et al.*, 2014 ; Sathre and O'Connor, 2010). Raymer (2006), souligne la forte variation de l'effet substitution-énergie du bois selon la technologie utilisée et la source d'énergie substituée. La quantité d'émissions gaz à effet de serre substituées serait à affiner **en collectant des informations supplémentaires sur les infrastructures pour le bois-énergie et ses usages énergétiques** (industriel ou domestique) au niveau de chaque pays. A titre d'illustration pour la France, l'ADEME utilise un coefficient de substitution énergie de 0,5 tCO₂éq/tCO₂éq (ADEME, 2015), qui correspond à un scénario où l'utilisation du bois pour du chauffage domestique remplace à 81 % du gaz et à 15 % du fioul, le reste se répartissant entre électricité, GPL et charbon. Si l'on applique au volume de bois-énergie importé ce coefficient au lieu de celui estimé à partir du mix énergétique national (Tableau 5) on observe une variation à la hausse de 78 % des émissions évitées par l'utilisation du bois-énergie (Figure 20). Cela correspond à **un usage national du bois-énergie défini de manière conventionnelle comme scénario de référence** et qui diffère du mix énergétique de la France¹⁴.

¹³ L'étude se repose sur les données de faostat qui n'incluent pas certaines catégories de produits comme les meubles ou papiers transformés.

¹⁴ Le mix énergétique national en 2015 se répartit quant à lui entre 45 % de produits pétroliers, 25 % d'électricité, 19 % de gaz naturel, 10 % d'énergies renouvelables et 2 % de charbon (Agence Internationale de l'Énergie)

III. EXPORTATION ET IMPORTATION DES PRODUITS LIGNEUX : QUEL IMPACT SUR LE BILAN CARBONE DE LA FILIÈRE

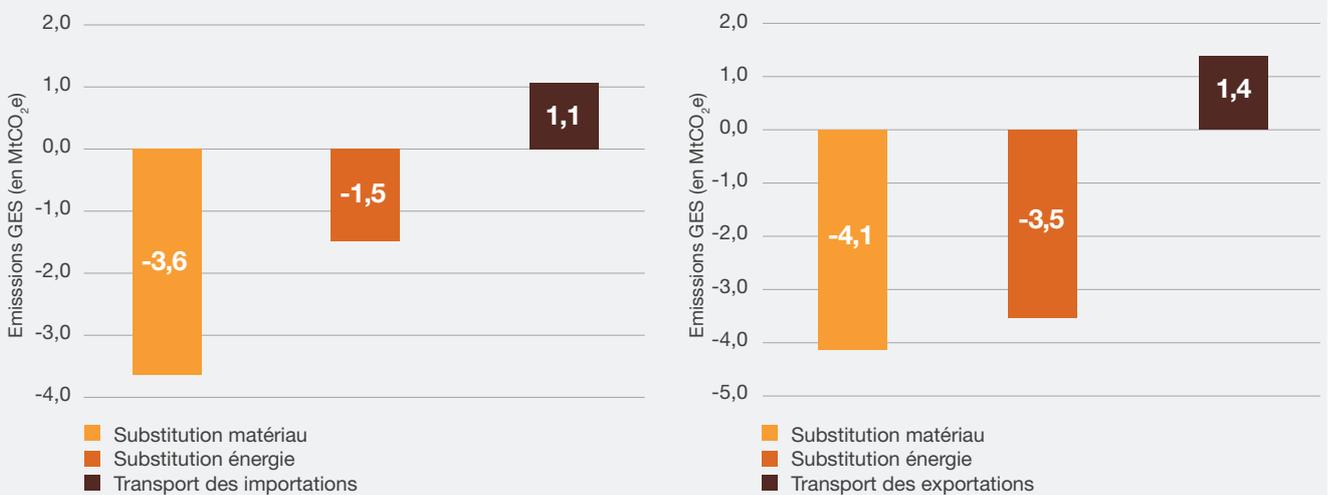
Pour estimer les effets de substitution associés au commerce international, on applique aux volumes de produits-bois échangés¹⁵ des facteurs de substitution en fonction de la catégorie des produits et du pays d'utilisation. Seul l'effet de substitution pour le cas de l'énergie varie selon les pays.

Dans la situation actuelle, **les exportations françaises de produits-bois**¹⁶ représentent un volume de 11,2 Mm³, tous produits confondus¹⁷. Les produits-bois contribuent à améliorer le bilan en GES de 7,6 MtCO₂éq/an chez les pays consommateurs de ces produits (Figure 11). A cela s'ajoute le prix du transport international en termes d'émissions, qui représentent 1,4 MtCO₂éq/an.

Quant aux **importations des produits-bois en France**, cela représente un volume de 8,4 Mm³, tous produits confondus. On observe que 5 MtCO₂éq/an sont évitées sur le territoire français (Figure 11). Enfin la prise en compte du transport des produits importés représente 1,2 MtCO₂éq/an.

Les émissions évitées par la consommation de produits-bois au sein des partenaires commerciaux actuels, varient selon deux effets : un effet « volume » et un effet « atténuation unitaire » (Figure 12). La Chine présente le montant le plus élevé d'émissions évitées avec 2,3 MtCO₂éq, qui s'explique en grande partie par l'importance de ses importations (34 % des exportations françaises¹⁸). Mais l'effet d'atténuation unitaire est également important du fait de l'intensité carbone du mix énergétique chinois, trois fois plus élevé que celui de la France (voir section III.D).

FIGURE 11. CONTRIBUTION DES PRODUITS BOIS À L'AMÉLIORATION DU BILAN CARBONE NATIONAL OU DES PARTENAIRES COMMERCIAUX : PRODUITS-BOIS IMPORTÉS (À GAUCHE) ET EXPORTÉS (À DROITE)



Source : Calculs des auteurs à partir des données Faostat

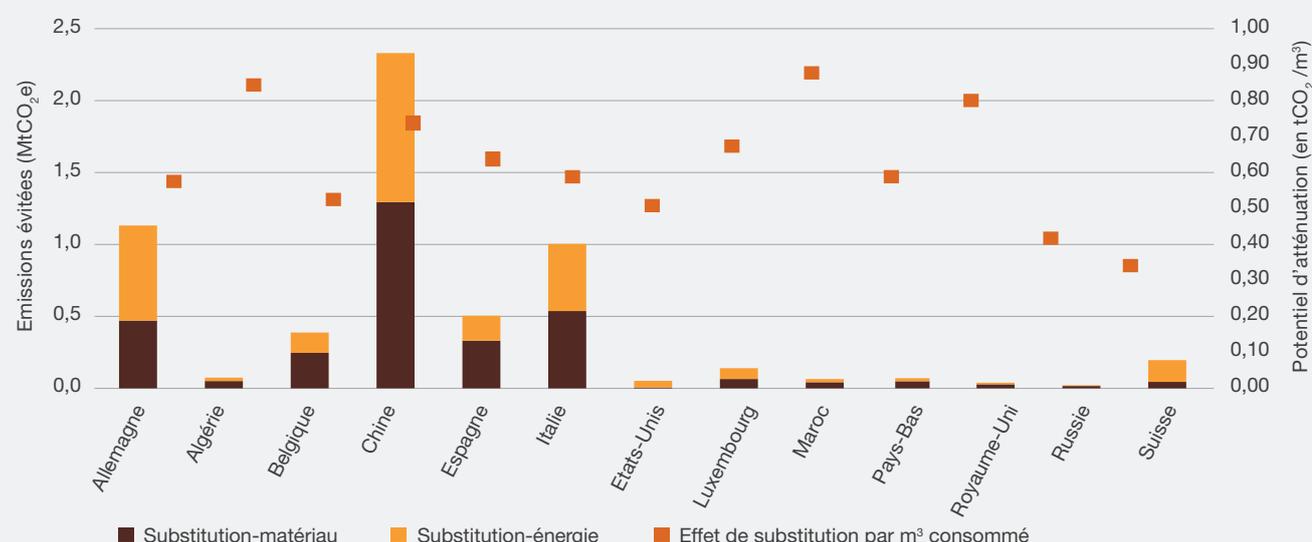
¹⁵ Il existe une incertitude sur les volumes de produits-bois exportés/importés. Des estimations plus précises sont en cours d'élaboration par les acteurs de la filière (Veille économique mutualisée)

¹⁶ Notons qu'une comparaison avec des données disponibles sur www.flux.biomasse.fr indique que les chiffres FAO présentés dans cette étude concernant les exportations françaises de bois rond sont environ 30 % supérieurs à ceux estimés sur www.flux.biomasse.fr

¹⁷ En en m³ équivalent bois rond, le volume import/export serait plus important.

¹⁸ Estimation à interpréter avec précaution, voir la section II.b.d.

FIGURE 12. SITUATION ACTUELLE : EMISSIONS EVITEES ET EFFET DE SUBSTITUTION UNITAIRE



Source : Faostat

B. Les émissions des échanges commerciaux de la filière bois au sein des indicateurs climatiques nationaux

Une fois les émissions associées aux échanges commerciaux au sein de la filière bois mises en avant, l'objectif est de les intégrer dans l'inventaire national français d'une part et sur l'empreinte carbone de la France d'autre part. L'incorporation au sein de l'inventaire ou de l'empreinte (Figure 13) revient ainsi à **rendre visible les émissions (et les émissions substituées) associées aux échanges commerciaux** et a vocation à servir de « boussole » aux décideurs publics.

Deux éléments sont ainsi à prendre en compte dans l'évaluation de l'impact des produits-bois :

- les **transports internationaux**, qui de manière générale et pour l'ensemble des produits manufacturés, figurent dans l'angle mort des inventaires nationaux. Nous avons vu que le transport des produits-bois échangés pèse de manière sensible, **retranchant de l'ordre de 20 % des gains carbone escomptés par la substitution**.
- **l'effet de substitution procuré par les produits ligneux échangés**, qui dépend notamment du pays dans lequel sont consommés les produits.

Afin de réaliser cet exercice, il convient de rappeler que l'effet de substitution généré par la consommation de produits-bois issus de la production nationale est **intrinsèquement déjà compris dans l'inventaire national car lié à la consommation intérieure**. Les émissions évitées par l'effet

de substitution apparaissent implicitement au sein d'autres secteurs que celui de la forêt (bâtiment, énergie...). Derrière le calcul de l'effet de substitution, le but recherché est de **rendre perceptible de manière théorique la contribution de la filière bois à la décarbonation des autres secteurs**.

A noter cependant que les derniers chiffres sur les effets de substitution apportés au niveau national (Madignier, 2015 ; Roux A *et al.*, 2017) ne prennent pas en compte les échanges internationaux. Ainsi les effets de substitution générés à la fois par l'exportation d'une partie de la production nationale et par les importations pour satisfaire la consommation intérieure ne sont pas visibles. Voici donc une proposition pour les faire apparaître :

- Pour une approche « inventaire » : **déduire les émissions évitées par les produits-bois exportés (a)** à l'ensemble des émissions évitées par la production nationale. Ensuite, **ajouter les émissions évitées par la consommation des produits-bois importés (b)**.
- Pour une approche « empreinte » : **compter au bénéfice de l'empreinte française les émissions évitées dans le reste des pays (c)** par les produits-bois exportés mais aussi de **l'alourdir à hauteur de la substitution dont elle prive ses partenaires commerciaux (d)** en important des produits-bois.

Le choix présenté pour l'empreinte est inverse de la convention courante – retrancher les exports et ajouter les imports – mais il semble logique dans la mesure où il s'agit ici d'émissions évitées et non d'émissions. Pour éviter de compter le transport international dans l'empreinte de deux pays, seul le transport lié aux importations est ajouté à l'empreinte française.

FIGURE 13. POIDS DU COMMERCE DES PRODUITS-BOIS AU SEIN DE L'INVENTAIRE NATIONAL ET L'EMPREINTE CARBONE

Inventaire national (en MtCO ₂ éq, pour l'année 2012)		Empreinte carbone nationale (en MtCO ₂ éq, pour l'année 2012)	
Emissions du territoire (tous secteurs confondus hors UTCTAF)	468	Emissions du territoire (tous secteurs confondus hors UTCTAF)	468
		- Emissions liées aux exportations	133
		+ Emissions liées aux importations	370
Dont émissions « évitées » via les effets de substitution nationaux (ajustées des exportations) (a)	- 36 *	Dont émissions « évitées » via les effets de substitution nationaux (ajustées des exportations)	- 36
Dont Emissions « évitées » via les effets de substitution liés aux importations (b)	-5		
+ Séquestration en forêt	- 60	+ Séquestration en forêt	- 60
		+ Emissions « évitées » via les effets de substitution liés aux exportations (c)	- 7.6
		- Emissions liées aux importations qui ne seront pas évitées dans d'autres pays (d)	+ 5
		+ Emissions liées au transport des produits-bois importés	+ 1,2
= Inventaire national français dont contribution de la filière forêt-bois	408	= Empreinte carbone de la France dont contribution de la filière forêt-bois	643.6
Emissions liées aux transports des produits-bois exportés**	+ 2,6		

Source : CGDD (SOes), INRA, CITEPA et résultats des calculs réalisés dans cette étude

* 42 MtCO₂éq estimés par Roux et al., (2017) auquel sont retranchés l'effet de substitution des produits exportés avec un coefficient de substitution-énergie appliqué à la France, soit 6 MtCO₂éq. Il convient de garder à l'esprit les limites posées par l'estimation d'un effet de substitution sur l'ensemble de la production nationale, à savoir une référence sans production de bois et donc un surcroît de séquestration en forêt non représenté ici. De plus, il peut potentiellement exister des divergences sur le calcul des émissions évitées selon la gestion de fin de vie et le niveau de valorisation énergétique des connexes.

** Les émissions associées aux transports internationaux figurent hors du périmètre de l'inventaire national.

C. Quels scénarios pour une transformation locale du bois ?

Quatre scénarios impliquant une politique de transformation locale du bois en France

Les scénarios présentés à la suite sont théoriques. Ils ont pour objectif d'explorer les variations d'émissions GES que procureraient diverses orientations pour la filière bois, notamment **celle d'une politique de transformation locale et de valorisation des connexes en bois-énergie**, une fois les défis technologiques et économiques levés.

A noter ici que les émissions associées au processus de production des produits-bois en fonction des pays ne sont pas prises en compte, faute de données. Dans une perspective de transformation locale, une analyse plus complète devrait prendre en compte l'énergie supplémentaire dépensée pour une transformation sur le territoire français et l'énergie économisée par l'absence de transformation correspondante dans d'autres pays. Notons toutefois que ces émissions ne représentent qu'une part minime du bilan carbone d'un produits-bois (voir section I.B).

L'analyse proposée porte donc sur l'**impact des effets de substitution** sur l'**inventaire français** d'une part et **sur les émissions totales dans l'atmosphère** d'autre part.

Dans l'ensemble des scénarios présentés (Tableau 1), nous avons fait l'hypothèse d'une consommation constante des produits-bois à l'échelle globale¹⁹ ainsi qu'un effet de substitution-matériau gardé constant pour la France et ses partenaires. Le coefficient de substitution-énergie varie pour sa part selon le mix énergétique de chaque pays. On considère que chaque m³ provenant de différentes essences sont interchangeable au sein des échanges avec l'extérieur. Dans les scénarios suivants, le carbone stocké dans les produits-bois n'a pas pu être pris en compte. Rappelons que l'effet de substitution présente un levier d'action climatique généralement plus important que l'effet de stockage (voir section I.A).

¹⁹ Cette hypothèse permet de considérer qu'un même volume de bois est globalement prélevé et consommé, et ainsi d'exclure plus facilement les émissions liées aux prélèvements en forêt.

- Le premier scénario intitulé « Réduction des échanges » cherche à évaluer l'effet du commerce international. Les échanges sont égaux aux soldes commerciaux nets de chaque catégorie de produit. Ce scénario n'a logiquement qu'un seul effet sur les émissions : diminuer les émissions liées aux transports.
- Le scénario « **Transformation locale et export** » décrit une situation où **la matière ligneuse brute et semi-transformée**, soit les grumes et sciages, **vient approvisionner les industries de 1^e et 2^e transformation sur le territoire national** au lieu d'être exportée. Les exportations de bois rond sont donc portées à zéro et les exportations de sciages sont réduites, en étant compensées par la diminution des importations de produits transformés de telle manière que le niveau de consommation nationale reste constant, quitte à exporter les excédents de connexes et/ou produits finis générés. Ce scénario suppose implicitement que l'élasticité-prix de la demande intérieure en produits-bois est nulle : la production intérieure supplémentaire ne stimule pas la consommation intérieure et l'excédent est exporté.

Comme récapitulé dans le **Tableau 1**, ces deux premiers scénarios impliquent une consommation constante en France et dans le reste des pays.

- Dans le scénario « **Transformation locale et consommation locale** », on reprend l'optique d'une transformation locale avec une modification

supplémentaire : le supplément de connexes généré par la relocalisation de la production est valorisé à travers les filières bois-énergie et bois-industrie selon la répartition actuelle au lieu d'être exporté. Ici, **la demande nationale en bois-énergie varie donc** à la hausse. Les importations et exportations des autres catégories de produits réagissent de la même manière que dans le scénario transformation locale, notamment l'excédent de la filière bois-industrie qui est exporté.

- Enfin dans un scénario « **Transformation locale et bois-énergie** », **le supplément de connexes** généré par la transformation locale est entièrement consommé en bois-énergie. Le reste des connexes continue d'alimenter les filières bois-industrie et bois-énergie. Dans le scénario précédent une partie venait approvisionner la filière bois-industrie et une partie était commercialisée avec une utilisation finale diversifiée (compostage, carbonisation...). Ici, l'ensemble des connexes est valorisé énergétiquement.

Dans ces deux derniers scénarios, la consommation apparente de produits-bois augmente en France et diminue dans le reste des pays. Un arbitrage implicite est mis en évidence, entre **la consommation en France d'un produit destiné au bois-énergie** et celle qui pourrait se faire au sein d'un autre pays présentant un mix énergétique plus carboné.

TABLEAU 1. RÉCAPITULATIF DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS EXPLORÉS

	 Réduction des échanges	 Transformation locale et export	 Transformation locale et consommation locale	 Transformation locale et bois-énergie
Echanges avec l'extérieur	• Diminution des échanges pour qu'ils soient égaux aux soldes commerciaux nets de chaque catégorie de produits-bois	• Exportations de grumes nulles • Exportations de sciages réduites	• Exportations de grumes nulles • Exportations de sciages réduites	• Exportations de grumes nulles • Exportations de sciages réduites
Consommation apparente en France	• → Consommation constante	• → Consommation constante	• → Consommation BO et BI constante • ↑ Consommation BE	• → Consommation BO et BI constante • ↑↑ Consommation BE
Consommation apparente pour le reste des pays	• → Consommation constante	• → Consommation constante	• → Consommation BO et BI constante • ↓ Consommation BE	• → Consommation BO constante • ↓ Consommation BI • ↓ Consommation BE
Connexes	• Volume constant	• Surplus de la filière BI et BE exporté	• Surplus de la filière BE consommé • Surplus de la filière BI exporté	• Totalité des connexes consommés en BE

Scénarios « Réduction des échanges »
et « Transformation locale et export » : le poids
significatif du commerce international



Le scénario « Réduction des échanges » entraîne une diminution drastique des échanges de la filière bois avec l'extérieur ; seuls les flux d'échanges nets permettant d'assurer une consommation apparente constante sont conservés.

FIGURE 14. BILAN EN GES DU SCÉNARIO
« RÉDUCTION DES ÉCHANGES »

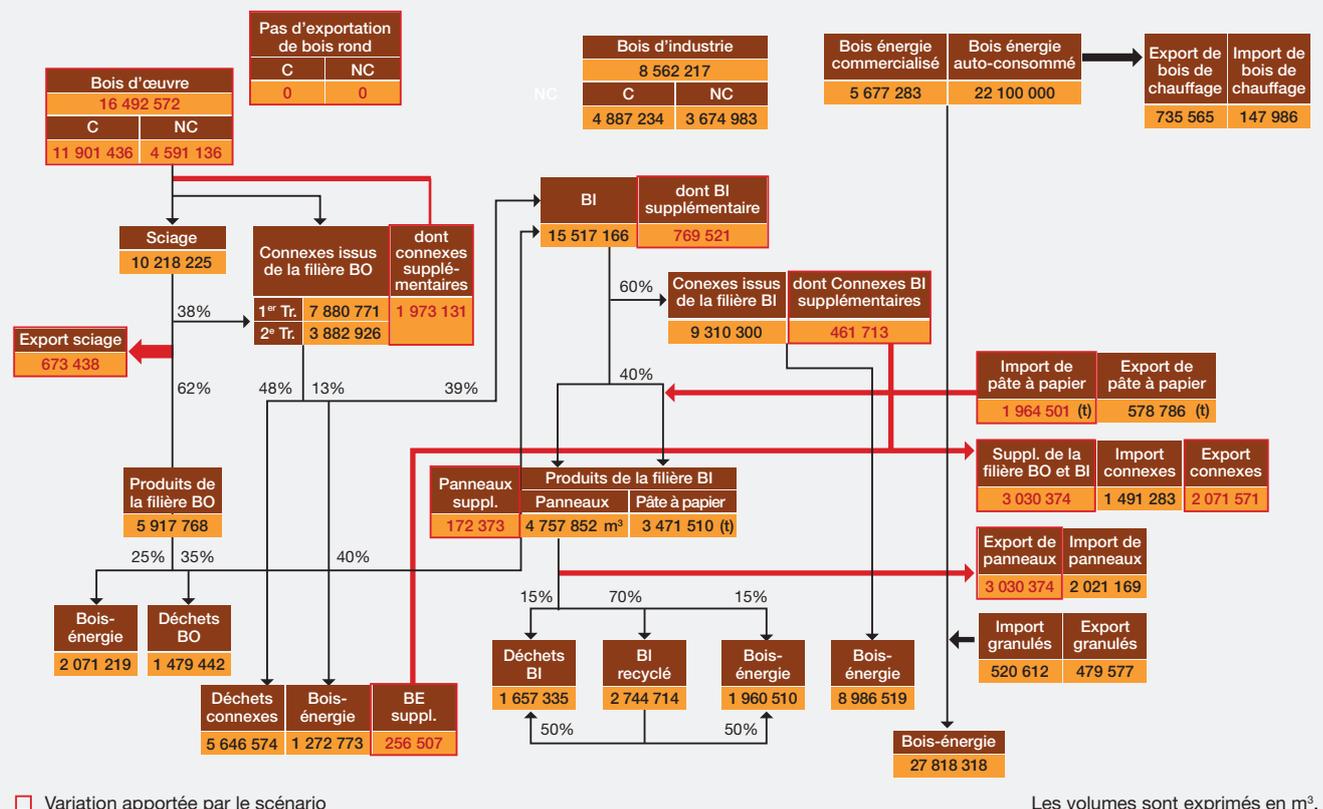
Approche « Inventaire »	• Aucune variation puisque la consommation nationale est constante.
Approche « Atmosphère »	• 1,6 MtCO ₂ en moins relâchées dans l'atmosphère. Cela s'explique par une diminution de 67 % des émissions associées au transport.

La perspective d'un tel scénario reste assez théorique mais présente l'intérêt de mettre en avant le poids non-négligeable des émissions du transport au sein de la filière forêt-bois.



Le scénario de transformation locale explore une situation où les produits bruts (grumes et sciages) ne sont plus exportés sous leur forme première, mais plutôt transformés sur le territoire français. Le premier effet observé est la mise à disposition de 2 Mm³ de connexes supplémentaires issus des grumes et sciages. Dans la configuration actuelle de la filière (Figure 15), le volume de connexes présente trois utilisations : une partie est valorisée en bois-énergie tandis que l'autre vient approvisionner à la fois la production de pâte à papier et la fabrication de panneaux. Dans ce scénario, cette structure de la filière dans l'usage des connexes est maintenue (4) Le second effet observé est la modification des volumes échangés pour certaines catégories de produits-bois (panneaux, connexes, sciages, pâte à papier). L'effet conjoint d'un arrêt des exportations de grumes et sciages, d'une mise à disposition de connexes

FIGURE 15. DIAGRAMME DE FLUX DU SCÉNARIO « TRANSFORMATION LOCALE ET EXPORT »



supplémentaires et d'une hypothèse de consommation domestique constante entraîne :

- l'exportation de 0,7 Mm³ de sciage, alors qu'actuellement la France est importatrice nette ;
- l'exportation de 0,2 Mm³ de panneaux et 0,7 Mm³ de connexes supplémentaires ;
- une réduction de 15 % du volume d'importation de pâte à papier.

FIGURE 16. BILAN EN GES DU SCENARIO « TRANSFORMATION LOCALE ET EXPORT »

Approche « Inventaire »	• Aucune variation puisque la consommation nationale est constante.
Approche « Atmosphère »	• 0.85 MtCO₂ en moins relâchées dans l'atmosphère. Cela s'explique par une diminution des émissions associées au transport de 35 % par rapport à la situation actuelle.

Ces deux scénarios **mettent en avant le poids du transport international. Ils n'ont pas d'impact sur l'inventaire français puisqu'ils ne modifient pas le niveau de consommation intérieure**, mais ont un impact direct sur les émissions nettes dans l'atmosphère qu'ils contribuent à réduire (Figure 19).

Dans la section suivante, nous explorons deux scénarios entraînant une amélioration de l'inventaire français liée à **une consommation accrue de bois-énergie et donc une augmentation des effets de substitution en France.**

Scénario « Transformation locale et consommation locale » et « Transformation locale et bois-énergie » : une amélioration de l'inventaire français au détriment d'un effet substitution énergie moindre dans le reste des pays



Le scénario « Transformation locale et consommation locale » reprend la même configuration que le scénario « Transformation locale et export ». Le volume de panneaux supplémentaires exporté ainsi que la diminution d'importation de pâte à papier restent donc identiques. La principale différence réside dans la valorisation des connexes supplémentaires, qui sont ici utilisés en bois-énergie au lieu d'être exportés, **impliquant de manière directe une augmentation de la consommation nationale de bois-énergie.**

FIGURE 17. BILAN EN GES DU SCENARIO « TRANSFORMATION LOCALE ET CONSOMMATION LOCALE »

Approche « Inventaire »	Augmentation des émissions évitées de 0,2 MtCO₂ à travers l'effet de substitution-énergie
Approche « Atmosphère »	<p>BILAN : 0.7MtCO₂ en moins dans l'atmosphère</p> <ul style="list-style-type: none"> + [• 0.9 MtCO₂ en moins relâchées dans l'atmosphère à travers une diminution des transports. • 0.2 MtCO₂ évitées à travers la substitution énergie en France - [• 0.4 MtCO₂ qui ne sont plus substituées dans des pays tiers (un « manque à gagner » pour l'atmosphère)

III. EXPORTATION ET IMPORTATION DES PRODUITS LIGNEUX : QUEL IMPACT SUR LE BILAN CARBONE DE LA FILIÈRE

Dans ce scénario, lorsque l'on adopte le point de vue de contribution de la France à la décarbonation de l'atmosphère, on observe :

- une réduction des émissions associées au transport ;
- l'amélioration de l'inventaire national de 0,2 MtCO₂²⁰, ce qui équivaut à 1,3 % de l'objectif de réduction pour le secteur résidentiel à l'horizon 2030 ;
- une « perte » de 0,4 MtCO₂ pour l'atmosphère due au transfert de la consommation des connexes.

La France présentant un mix énergétique moins carboné que ses partenaires commerciaux, une consommation nationale accrue de bois-énergie signifie que d'autres pays renoncent à cette ressource bois et se reportent sur d'autres énergies, notamment fossiles.

²⁰ Notons la présence d'une incertitude due au volume bois ronds exportés pouvant faire varier le résultat à la baisse de 0,06 MtCO₂.

- Ce scénario met en avant le fait qu'une transformation locale des produits-bois est pertinente si la diminution des émissions associées au transport international (0,9 MtCO₂) est supérieure à la perte de potentiel de substitution résultant d'une **valorisation en bois-énergie des connexes supplémentaires issus d'une transformation locale (0,2 MtCO₂)**. Le bilan climatique de ce scénario est donc une amélioration de 0,7 MtCO₂, **grâce à la compensation du transfert de substitution par la réduction des émissions dues au transport.**



Le dernier scénario exploré ici **formule l'hypothèse que 100 % des connexes supplémentaires obtenus vont au bois-énergie**. Précédemment uniquement la moitié était valorisé en BE et BI, l'autre moitié ayant une utilisation tierce à la filière bois (terreau, paillage...).

FIGURE 18. BILAN EN GES DU SCENARIO « TRANSFORMATION LOCALE ET BOIS-ENERGIE »

Approche « Inventaire »	Augmentation des émissions évitées de 0,6 MtCO ₂ à travers l'effet de substitution-énergie	
	BILAN : 1,05 MtCO₂ en moins dans l'atmosphère	
Approche « Atmosphère »	+	<ul style="list-style-type: none"> • 0,95 MtCO₂ en moins relâchées dans l'atmosphère à travers une diminution des transports. • 0,6 MtCO₂ évitées à travers la substitution énergie en France
	-	<ul style="list-style-type: none"> • 0,5 MtCO₂ qui ne sont plus substituées dans des pays tiers (un « manque à gagner » pour l'atmosphère)*

* Le manque à gagner pour le reste des pays est relativement réduit, parce qu'on considère que les produits de la filière papetière, où sont dirigés normalement une partie de connexes, présentent de coefficient de substitution nul.

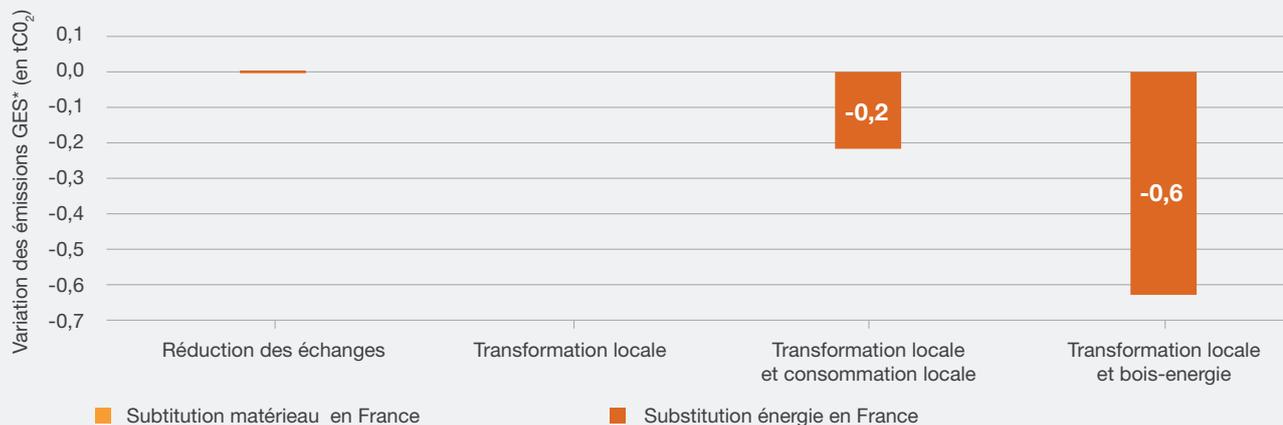
Ce scénario présente des conclusions similaires au scénario précédent : la France améliore davantage son inventaire national en consommant plus de connexes valorisés en bois-énergie²¹ (-0,6 MtCO₂), ce qui équivaut à 4 % de l'objectif de réduction pour le secteur résidentiel à l'horizon 2030. La contribution à la décarbonation des autres pays est diminuée de 0,4 MtCO₂ pour la substitution énergie et de 0,1 MtCO₂ pour la substitution matériau car moins de produits de la filière bois industrie sont exportés par la France.

Notons qu'une hypothèse supplémentaire est formulée dans ce scénario qui est celui d'une utilisation totale des connexes en bois-énergie. L'augmentation de l'effet de substitution-énergie est **majoritairement due à la modification du taux d'utilisation des connexes par la filière bois** qui passe de 48 % à 100 %. Il en découle également une modification de la structure de production de la filière en faveur d'une utilisation des connexes entièrement dirigée vers de la production d'énergie, impliquant une réduction marginale de la matière allouée à la filière bois-industrie.

²¹ Notons la présence d'une incertitude due au volume bois ronds exportés pouvant faire varier le résultat à la baisse de 1 MtCO₂.

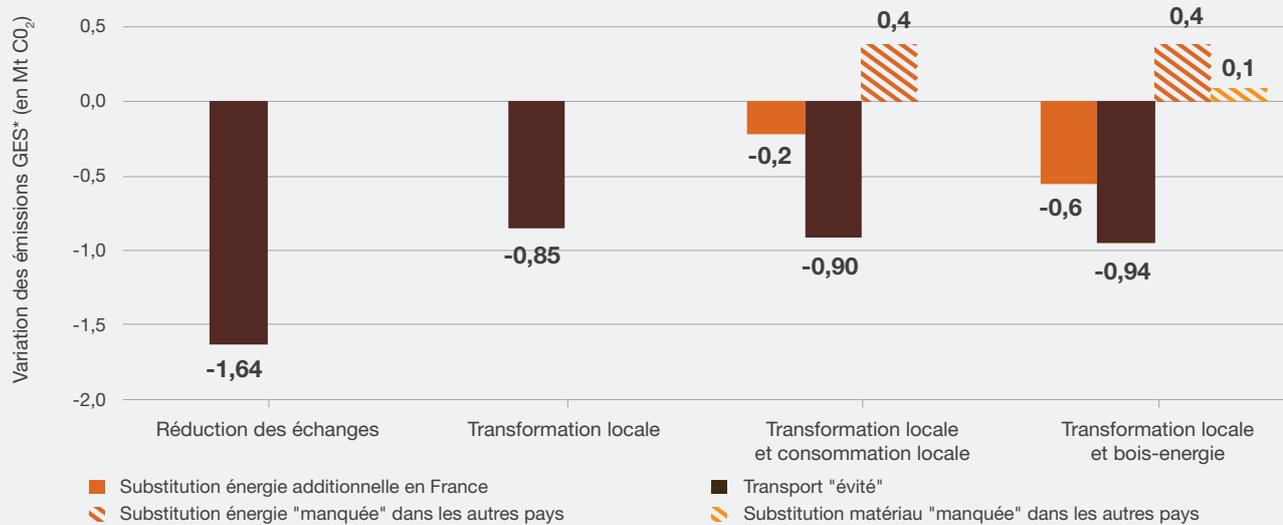
FIGURE 19. BILAN DES EMISSIONS GES DES DIFFERENTS SCENARIOS :

• **APPROCHE « INVENTAIRE »**



*Emissions GES par rapport à la situation actuelle

• **CONTRIBUTION DE LA FRANCE A LA DECARBONATION DE L'ATMOSPHERE**



* Variation des émissions GES par rapport à la situation actuelle

D. Méthode

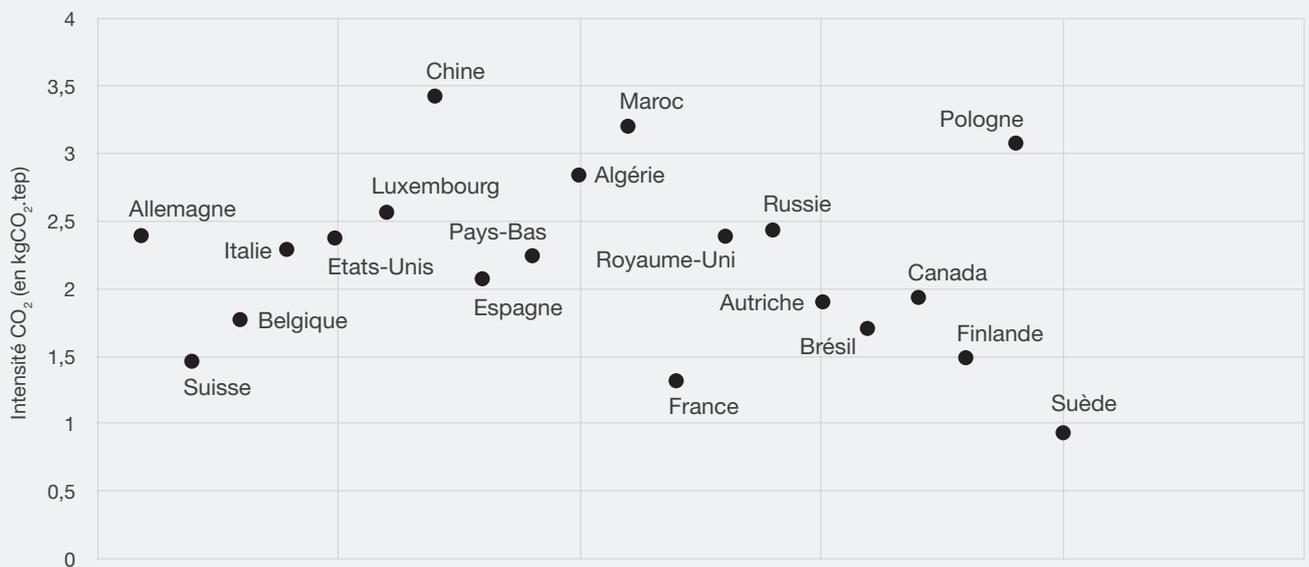
A partir du diagramme des flux de la filière forêt-bois française présentée section II.A, on déduit les volumes supplémentaires de connexes disponibles grâce à une relocalisation des première et seconde transformation. Les coefficients de substitution pour le bois d'œuvre et bois d'industrie sont principalement tirés de Valade *et al.*, (2017). Soulignons qu'une récente méta-analyse des différentes études sur les coefficients de substitution des produits-bois confirme la pertinence d'un coefficient moyen pour les filières BO et BI (hors filière papetière) de 1,2 kgC.kgC⁻¹ (Leskinen *et al.*, 2018). Pour ce qui est de la substitution énergie, un coefficient est calculé par pays, dépendant du mix énergétique de chaque pays (voir ci-après). Enfin, les émissions liées au transport international sont basées sur les distances entre capitales, avec un transport principalement

routier pour l'intra-européen et maritime pour l'international. Le détail des facteurs d'émissions est disponible dans une section dédiée au transport des produits-bois en annexe.

Substitution énergie

Pour estimer la substitution énergie des principaux partenaires commerciaux de la France, on utilise l'intensité carbone de leur secteur énergétique tel qu'estimé par la Banque mondiale, soit les tonnes de carbone émises par unité d'énergie produite (Figure 20). La prépondérance du secteur nucléaire permet à la France d'avoir un mix énergétique national décarboné comparé à d'autres pays. Parmi les principaux partenaires commerciaux, la Chine, le Maroc et l'Algérie sont ceux qui présentent une intensité carbone la plus élevée. Cette représentation de la substitution énergie est très approximative car l'énergie substituée par le bois correspond rarement à la moyenne du mix.

FIGURE 20. INTENSITE CARBONE DES SYSTEMES ENERGETIQUES NATIONAUX DES PARTENAIRES COMMERCIAUX



Source : Banque Mondiale

Conclusion

Alors qu'on observe un déficit commercial structurel de 6 milliards d'euros de la filière forêt-bois, notamment marqué par une exportation des produits bruts (grumes) et une importation des produits-bois semi-transformés et transformés (par exemple sciages et placages), un scénario de transformation locale des produits-bois permettrait justement d'allier intérêt économique et climatique. Option déjà préconisée par plusieurs documents de politiques publiques, I4CE se propose d'apporter une première estimation chiffrée de l'impact d'un tel scénario du point de vue climatique.

Dans un premier temps, cette étude apporte une illustration de l'impact des échanges commerciaux de produits-bois avec l'extérieur en termes de substitution. **L'utilisation de produits-bois importés en France permet d'économiser au moins 5 MtCO₂, bien qu'environ 20 % de ces émissions sont réémises lors du transport international de ces produits.**

Les différents scénarios explorés ensuite s'attachent à démontrer l'intérêt d'un scénario de « transformation locale » des produits-bois à la fois pour 1) l'inventaire national français et 2) les émissions GES dans l'atmosphère. Alors **que des hypothèses conservatrices sont utilisées sur plusieurs aspects** (taux de valorisation des connexes en bois-énergie, coefficient de substitution du bois-énergie²², etc.), le résultat de cette étude est **qu'une relocalisation de la transformation du bois a un impact positif du point de vue du climat**, grâce aux émissions de transport évitées et à la valorisation des connexes supplémentaires obtenus en bois-énergie.

Rendre visible les émissions « évitées » qui sont dépendantes des échanges commerciaux vient s'ajouter à l'information dirigée à l'attention des décideurs publics et des acteurs de la filière. L'objectif recherché est de co-construire une orientation de la filière pour pouvoir relever deux défis : celui **de redynamiser une transformation dans les territoires et entreprendre des actions qui restent « climat compatible » avec les orientations nationales**. Les signaux se multiplient pour accentuer notre consommation de produits-bois dans les années à venir, majoritairement dans le secteur de la construction. **Or, l'avantage climatique serait limité si cela se traduisait par une alimentation du déficit commercial de la filière et donc des émissions GES liées au transport international**. Une transformation locale des produits-bois représente une piste pour réduire et maîtriser nos émissions GES car :

- étant donné les systèmes énergétiques des partenaires commerciaux de la France, un produit-bois transformé en dehors de la France est susceptible de mobiliser d'une part une **quantité d'énergie supplémentaire** (intensité énergétique) et d'autre part **une énergie plus carbonée** (ce qui est illustré par le coefficient de substitution énergie par pays) ;
- **l'utilisation de connexes en bois-énergie se doit de respecter « une articulation des usages »**, c'est-à-dire d'abord être utilisé pour la confection de produits-bois ayant une durée de vie plus longue (par exemple en panneaux utilisés par le secteur de la construction) avant d'être valorisé en dernier recours en bois-énergie. Les hypothèses des derniers scénarios misent sur **une valorisation en énergie uniquement des connexes supplémentaires obtenus par une relocalisation de la transformation des produits-bois au sein des scieries françaises** ;
- dans cette étude, la question reste entière quant **aux signaux économiques à mettre en place pour enclencher une transformation sur le territoire des produits-bois afin de valoriser les connexes**, sans tomber dans un détournement uniquement vers une utilisation énergétique. Les produits finis des filières bois d'œuvre et bois d'industrie représentent à la fois une grande partie de la valeur ajoutée de la filière bois et un effet de substitution supérieur.

La contribution du secteur forêt-bois pour que la France puisse atteindre la neutralité carbone en 2050 implique d'améliorer l'efficacité carbone de l'usage produits-bois ; relocaliser la transformation des produits-bois permettrait d'aller en ce sens. Pour l'illustrer prenons le Plan National Forêt-bois qui prévoit une augmentation de la mobilisation de +12 Mm³/an en 2026 par rapport à ce qui a été récolté durant la période 2011-2015 ; cela devrait résulter en la production de 2,3 Mtep.

Les résultats obtenus indiquent ainsi qu'en relocalisant la transformation des produits-bois sur le territoire et sans augmenter la consommation de produits, on obtient de la biomasse supplémentaire qui représente, pour les scénarios « transformation locale et consommation locale » et « transformation locale et bois-énergie », entre 133 000 tep/an et 543 000 tep/an. **Cela reviendrait à une contribution de respectivement 6 % et 16 % de la production d'énergie associée à l'objectif défini par le PNFB**, allégeant ainsi un recours aux importations de produits-bois à finalité énergétique.

²² Le coefficient de substitution énergie utilisé est celui de la Banque Mondiale, qui considère le mix énergétique moyen de la France (relativement décarboné), et non le mix calorifique spécifique aux usages du bois-énergie. L'analyse de sensibilité entre les différents coefficients de substitution énergie est disponible en annexe.

Bibliographie

- ADEME. 2015. « Forêt et atténuation du changement climatique ». Les avis de l'ADEME. Paris, France: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie.
- — — —. 2016. « Contraintes techniques et économiques des différents types de transport pour la biomasse bois ».
- Agostini, A., J. Giuntoli, et A. Boulamanti. 2013. « Carbon accounting of forest bioenergy ». JRC Technical Report. Ispra, Italy: European Commission, Joint Research Centre.
- Agreste. 2017. « Récolte de bois et production de sciages en 2016 ». <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/primeur349.pdf>.
- Agreste conjoncture. 2018. « Le déficit de la filière bois se creuse en 2017 ».
- Agreste primeur. 2014. « Récolte de bois et production de sciages en 2012 ». 310.
- Alexandre, Sylvie. 2014. « Le bois, un matériau rare ? Vers une hiérarchie des usages du bois ». *Revue Forestière Française*, n°3: Fr., ISSN 0035. <https://doi.org/10.4267/2042/56062>.
- — — —. 2017. « Rapport de mission de la déléguée interministérielle à la forêt et au bois ». CGEDD. <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-28825-rapport-deleguee-foret-bois.pdf>.
- Association des communes forestières de l'Isère. 2011. « Espace et forêts », n°18.
- Baron, F., V. Bellassen, et M. Deheza. 2013. « The contribution of European forest-related policies to climate change mitigation: energy substitution first ». Climate Report 40. Paris, France: CDC Climat Research.
- Baude, Manuel. 2018. « L'empreinte carbone - Note préalable à l'élaboration du troisième rapport gouvernemental annuel au titre de la loi dite "SS" du 13 avril 2015 : "Les nouveaux indicateurs de richesse-2017" ». document de travail n°38. CGDD-SoeS.
- Bellassen, Valentin, et Sebastiaan Luysaert. 2014. « Carbon sequestration: Managing forests in uncertain times ». *Nature* 506 (7487): 15355. <https://doi.org/10.1038/506153a>.
- Bergman, Richard D., Robert H. Falk, Hongmei Gu, Thomas R. Napier, et Jamie Meil. 2013. « Life-Cycle Energy and GHG Emissions for New and Recovered Softwood Framing Lumber and Hardwood Flooring Considering End-of-Life Scenarios ». FPL-RP-672. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. <https://doi.org/10.2737/FPL-RP-672>.
- Bergman, Richard, Maureen Puettmann, Adam Taylor, et Kenneth E. Skog. 2014. « The Carbon Impacts of Wood Products ». *Forest Products Journal* 64 (78): 22031. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-14-00047>.
- CGDD. 2016. « Chiffres clés du transport ». CGDD.
- CGDD-SOeS. 2017. « Chiffres clés du climat France et Monde - Edition 2017 », 80.
- Chalayer, Maurice. 2015. « L'ÉTAT DE GRÂCE DES PRODUITS CONNEXES DE SCIERIE ! », 9.
- CITEPA. 2018. « Rapport CCNUCC ». https://www.citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/CCNUCC/CCNUCC_france_2018.pdf.
- Deheza, Mariana, Valentin Bellassen, et Carmen N'Goran. 2014. « What incentives to climate change mitigation through harvested wood products in the current french policy framework? » Climate Report 47. Paris, France: CDC Climat Research. <http://www.cdclimat.com/Climate-Report-no47-What.html>.
- Deroubaix, G, E Vial, et C Cornillier. 2012. « Cycles de vie des produits à base de bois et séquestration du carbone ».
- Elisabeth Le Net, Gert Anderson, Fahrudin Bajric, Diana Vötter, et Staffan Berg. 2011. « Identification of existing transport methods and alternative methods or new approaches with data about costs, labour input and energy consumption ». Technical Report 76. European Forest Institute.
- FAO. 2017. « Questionnaire commun sur le secteur forestier ».
- — — —. 2018. « Annuaire des produits forestiers en 2016 ».
- Fortin, Mathieu, François Ningre, Nicolas Robert, et Frédéric Mothe. 2012. « Quantifying the Impact of Forest Management on the Carbon Balance of the Forest-Wood Product Chain: A Case Study Applied to Even-Aged Oak Stands in France ». *Forest Ecology and Management* 279 (septembre): 17688. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.031>.
- Franqueville, Christian. 2015. « Mission relative aux exportations de grumes et au déséquilibre de la balance commerciale de la filière forêt-bois française ».
- IGN. 2017. « Memento-inventaire forestier ». https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/memento_2017.pdf.
- JRC. 2010. « International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. » Luxembourg. Publications Office of the European Union: European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability.
- Koebel, Bertrand M., Anne-Laure Levet, Phu Nguyen-Van, Indradev Purohoo, et Ludovic Guinard. 2016. « Productivity, Resource Endowment and Trade Performance of the Wood Product Sector ». *Journal of Forest Economics* 22 (janvier): 2435. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2015.10.004>.
- Levet, Anne-Laure, Ludovic Guinard, et Indradev Purohoo. 2014. « LE COMMERCE EXTÉRIEUR DES Produits-bois : EXISTE-T-IL RÉELLEMENT UN PARADOXE FRANÇAIS ? » *Revue Forestière Française*, n°1: 51. <https://doi.org/10.4267/2042/54052>.
- Leskinen, Pekka, Giuseppe Cardellini, Sara González-García, Elias Hurmekoski, Roger Sathre, Jyri Seppälä, Carolyn Smyth, Tobias Stern, et Pieter Johannes Verkerk. 2018. « Substitution Effects of Wood-Based Products in Climate Change Mitigation », 28.
- Lippke, Bruce, Richard Gustafson, Richard Venditti, Philip Steele, Timothy A. Volk, Elaine Oneil, Leonard Johnson, Maureen E. Puettmann, et Kenneth Skog. 2012. « Comparing Life-Cycle Carbon and Energy Impacts for Biofuel, Wood Product, and Forest Management Alternatives* ». *Forest Products Journal* 62 (4): 24757. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-12-00017.1>.
- Madignier, Marie Laurence. 2015. « Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique », 83.
- Misak Avetisyan, Anca Cristea, David Hummels, et Laura Puzzello. 2010. « Trade and the Greenhouse Gas Emissions from International Freight Transport ».
- National Technical University of Athens. 2008. « Ships emissions study ».
- Petersen Raymer, Ann Kristin. 2006. « A Comparison of Avoided Greenhouse Gas Emissions When Using Different Kinds of Wood Energy ». *Biomass and Bioenergy* 30 (7): 60517. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.01.009>.

-
- Pouet, Jean Christophe, et Alice Gauthier. 2013. « ETUDE SUR LE CHAUFFAGE DOMESTIQUE AU BOIS: MARCHES ET APPROVISIONNEMENT », 87.
 - Puettmann, Maureen E, et James B Wilson. 2005. « LIFE-CYCLE ANALYSIS OF WOOD PRODUCTS: CRADLE-TO-GATE LCI OF RESIDENTIAL WOOD BUILDING MATERIALS ». *WOOD AND FIBER SCIENCE* 37: 12.
 - Ramage, Michael H., Henry Burrige, Marta Busse-Wicher, George Fereday, Thomas Reynolds, Darshil U. Shah, Guanglu Wu, et al., 2017. « The Wood from the Trees: The Use of Timber in Construction ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68 (février): 33359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>.
 - Roux A, Dhôte J.-F, Achat D, et Bastick C. 2017. « Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation ». INRA et IGN.
 - Sathre, Roger, et Jennifer O'Connor. 2010. « Meta-Analysis of Greenhouse Gas Displacement Factors of Wood Product Substitution ». *Environmental Science & Policy* 13 (2): 10414. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.12.005>.
 - Valade et al., . 2017. « Projet BICAFF : Bilan carbone de la ressource forestière française ». CNRS, INRA, IRSTEA.
 - Valade, Aude, Valentin Bellassen, Claire Magand, et Sebastiaan Luysaert. 2017. « Sustaining the Sequestration Efficiency of the European Forest Sector ». *Forest Ecology and Management* 405 (décembre): 4455. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.009>.
 - Van Der Werf, Hayo, et Thi Tuyet Hanh Nguyen. 2015. « Construction cost of plant compounds provides a physical relationship for co-product allocation in life cycle assessment ». *International Journal of Life Cycle Assessment* 20 (6): 77784. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0872-0>.
 - Zhang, Xiaobiao, Hongqiang Yang, et Jiaxin Chen. 2018. « Life-Cycle Carbon Budget of China's Harvested Wood Products in 1900–2015 ». *Forest Policy and Economics* 92 (juillet): 18192. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.05.005>.

Annexe A - Méthodes

Allocation de l'usage économique des ressources forestières pour la reconstitution des flux de la filière et les scénarios

Les données utilisées sont celle de l'EAB qui reflètent l'utilisation déclarée par les entreprises soit l'usage économique actuel et effectif de la ressource forestière. Les statistiques sur les volumes importés et exportés de FAOSTAT utilisent uniquement trois distinctions : le bois rond conifère, le bois rond feuillu non-tropical et le bois rond feuillu tropical. A partir des usages économiques observés au niveau national par l'enquête EAB entre 2011 et 2014, on en déduit le volume de feuillu et conifère destiné à chaque filière (Tableau 2).

TABLEAU 2. VENTILATION DE LA CATÉGORIE BOIS ROND INDUSTRIEL À PARTIR DES DONNÉES DE L'EAB

	BO	BI	BE
Bois rond industriel conifère	65 %	35 %	0 %
Bois rond industriel feuillu	33 %	26 %	41 %

Source : A partir des données de l'enquête EAB.

L'allocation de l'usage économique des produits exportés se fait selon des usages communément observés au sein de la filière française et consolidés dans le diagramme de filière (4). Pour le bois rond exporté toutefois, on considère qu'il s'agit de bois de qualité « bois d'œuvre » et qui rentre donc dans le diagramme par un passage en scierie plutôt que par une usine de trituration ou une chaudière.

Gestion de la fin de vie

Pour intégrer la gestion de fin de vie, les coefficients déjà synthétisés au sein de (Valade *et al.*, 2017) sont repris, que ce soit pour la France ou les pays tiers sauf la Chine. Cette hypothèse est justifiée par le fait que la majorité des pays consommateurs de produits-bois français sont des pays européens.

Pour la Chine où se dirigent 34 % des produits-bois exportés, la gestion de fin de vie considérée est celle décrite dans (Zhang *et al.*, 2018). Pour les produits ligneux 0,25 % des produits sont valorisés énergétiquement le reste est considéré comme terminant dans une décharge.

Coefficients de substitution

Les coefficients de substitution utilisés sont ceux calculés au sein de l'étude BICAFF (Valade *et al.*, 2017) et permettent de calculer les émissions évitées lorsque des produits-bois sont utilisés en lieu de produits plus émetteurs de gaz à effet de serre. La quantité de bois injectée sur le marché national est considérée comme un volume supplémentaire à ce qui est déjà produit et consommé. L'effet de substitution calculé pour ce scénario s'exprimera donc en « tonnes de gaz à effet de serre évitées », en comparaison avec ce qui est effectivement émis par la consommation actuelle de produits alternatifs au bois.

Les coefficients tirés de (Valade *et al.*, 2017) sont repris, que ce soit pour la France ou les pays tiers sauf la Chine.

TABLEAU 3. USAGES ÉCONOMIQUES DES PRODUITS EXPORTÉS DANS LE SCÉNARIO « BAU & MIX ÉNERGÉTIQUE NATIONAL »

Catégorie de produits	Description modélisation de la filière de production	
Bois rond industriel	Allocation des usages finaux similaire à une grume entrant en scierie	
Connexes	Plaquettes et particules de bois*	A partir des tendances observables au sein de la filière de production française et des données de l'enquête EAB, on alloue 70 % est destinée au à la filière bois-industrie et 30 % à une utilisation sous forme de bois-énergie
	Résidus**	La totalité du volume est attribuée à la filière bois-énergie
	Connexes issus du processus de transformation	La valorisation des connexes générés par la transformation de grumes et sciages dans les pays tiers est pris en compte dans les mêmes proportions que celles observées au sein de la filière forêt-bois française***
Bois de chauffage	La totalité du volume est attribuée à la filière bois-énergie	
Granulés et agglomérés	La totalité du volume est attribuée à la filière bois-énergie	
Sciages	Allocation identique à un sciage entrant dans la filière française	
Panneaux dérivés du bois	Fin de vie et recyclage supposé identique à la filière française	

* Défini comme « du bois en petits fragments se prêtant à la fabrication de panneaux, l'utilisation comme combustibles ou pour d'autres fins » (FAO, 2017).

** Défini comme « résidus non utilisables comme bois d'œuvre [...] ainsi que les résidus de bois qui sont utilisés pour la production de granulés de bois et agglomérés » (FAO, 2017).

*** Se référer à la figure 4 section II.A qui illustre les flux de matières au sein de la filière forêt-bois.

Cette hypothèse est justifiée par le fait que la majorité des pays consommateurs de produits-bois français sont des pays européens. Pour la Chine où se dirigent 34 % des produits-bois exportés, la gestion de fin de vie considérée est celle décrite dans (Zhang, Yang, et Chen, 2018). Pour les produits ligneux 0,25 % des produits sont valorisés énergétiquement le reste est considéré comme terminant dans une décharge.

TABLEAU 4. COEFFICIENT DE SUBSTITUTION DES DIFFÉRENTES CATÉGORIES DE PRODUITS-BOIS (TC TC⁻¹)

Catégorie de produit-bois	Coefficient de substitution
BO	1,2
BI (papier)	0
BI (panneaux)	0,53

Source : Valade et al., (2017)

Les calculs pour déterminer l'effet de substitution des scénarios sont :

Effet de substitution (énergie ou matériau) (tCO₂éq) = V^x x D x Ca x Coeff^x x 44/12

D : Densité du bois (en tonne sèche sous écorce. m⁻³)*

Ca : Contenu carbone du bois anhydre** (tC tMS⁻¹)

V^{BE} / V^{BO} / V^{BI} : Volume de bois supplémentaire pour chaque filière (m³)

Coeff^{BO} / Coeff^{BI} / Coeff^{BE} : Coefficient de substitution pour chaque filière (tC tC⁻¹)

* La densité du bois varie entre 0,46 et 0,61 selon les essences considérées. Ici nous prendrons une moyenne de 0,5 qui est communément prise dans les études sur le sujet. (Sathre and O'Connor, 2010) ; Valade et al., 2017 ; FCBA, 2017)

** Une tonne de bois sec contient 0.5 t de carbone, quelle que soit l'essence. (FCBA, 2018).

Pour les volumes de produits exportés en situation actuelle, un coefficient de substitution du bois-énergie est calculé à partir de l'intensité carbone des systèmes énergétiques nationaux des partenaires commerciaux. L'hypothèse formulée est que la consommation de bois-énergie permet d'éviter l'émission de gaz à effet de serre issus de l'utilisation

des différentes sources énergétiques (pétrole, gaz, charbon) composant le mix énergétique du pays consommateur de produits-bois français.

Les modalités de transport des produits-bois

Le secteur industriel représente 20 % des émissions GES mondiales et l'activité de fret international – défini par l'Agence International de l'Energie comme le transport aérien et maritime international – est à l'origine de 17 % des émissions du secteur industriel (Misak Avetisyan et al., 2010).

Pour les catégories de produits-bois présentant un effet de substitution (bois rond, sciage, placage, plaquettes et particules de bois ainsi que panneaux), on identifie vingt partenaires commerciaux qui représentent respectivement 80 % des exportations et 86 % des importations sur la période 2011-2015.

Transport intra-européen des produits-bois

En Europe

Selon le rapport Eforwood (Elisabeth Le Net et al., 2011), la répartition modale des transports pour le bois rond et produits-bois semi-transformés²³ est similaire à celle observée pour l'ensemble des commodités au sein de l'Union Européenne, avec 79 % du transit effectué par transport routier, 20 % en transport ferroviaire et 1 % en transport fluvial. En 2016, le transport routier des produits-bois représentaient (en t.km) 6 % de l'ensemble du fret routier au sein de l'Union Européenne (Eurostat, 2018).

En France

Une spécificité du transport des produits-bois est l'utilisation pour le fret routier d'engins structurellement adaptés au transport du bois rond. Trois familles de transporteurs se

²³ En 2007, une réorganisation de la nomenclature utilisée par Eurostat modifie le périmètre de la catégorie « bois et produits-bois ». L'étude Eforwood se base sur des données antérieures à 2007 où cette catégorie englobe les grumes et produits semi-transformés. La catégorie « bois et produits-bois » telles qu'employées actuellement englobe « les bois sciés et rabotés, articles en bois et en liège, à l'exclusion des meubles ; les articles de vannerie et de sparterie ; papiers et pâtes à cartons », excluant les grumes qui sont comptabilisés avec les produits agricoles. Pour plus d'informations : <http://ec.europa.eu/eurostat/ramon/nomenclatures/>.

TABLEAU 5. COEFFICIENTS DE SUBSTITUTION ÉNERGIE SELON LE MIX ÉNERGÉTIQUE NATIONAL

Coefficient de Substitution-énergie selon pays de destination (en tC.tC ⁻¹)																			
Allemagne	Suisse	Belgique	Italie	Etats-Unis	Luxembourg	Chine	Espagne	Pays-Bas	Algérie	Maroc	France	Royaume-Uni	Russie	Autriche	Brésil	Canada	Finlande	Pologne	Suède
0,56	0,34	0,41	0,53	0,56	0,60	0,80	0,49	0,53	0,67	0,75	0,31	0,56	0,57	0,44	0,40	0,45	0,34	0,72	0,22

Source : A partir des données de la Banque Mondiale

TABLEAU 6. FACTEUR D'ÉMISSIONS PAR MODE DE TRANSPORT

Description du mode de transport type	Transport maritime		Transport routier	Transport ferroviaire
	Vraquier	Navire porte-conteneur	Ensemble articulé transportant de la marchandise grand volume avec un PTRA de 40 tonnes	Train moyen de 1 000 t, transportant des marchandises moyennement denses avec un mode de traction mixte (90 % électrique et 10 % diesel)
Facteur d'émission (en gCO ₂ /t.km)	4,5	12,87	105	4,26

distinguent ; les camions-remorques, semi-remorques et grumiers utilisés pour respectivement 70 %, 18 % et 12 % du transport de produits-bois entre la forêt et un site industriel en France (Afocel, 2006). La charge utile de ces véhicules varie entre 39 et 43 tonnes (Le Net *et al.*, 2011). D'un point de vue légal, le transport du bois rond en France est normé par le décret n°2009-780²⁴, limitant le poids total roulant autorisé (PTRA) à 57 tonnes pour les véhicules à six essieux et 48 tonnes pour les véhicules à cinq essieux. Le texte précise qu'il doit y avoir une absence d'alternative économique au transport routier pour que celui-ci soit autorisé. Le transport des particules et plaquettes de bois peut se faire sans engins spécialisés, à la différence des grumes, par exemple avec un camion équipé d'un grand conteneur ce qui contribue à réduire les coûts de transport. Dans ce cas, la charge utile moyenne est évaluée à 23 tonnes (Afocel, 2006). Ces considérations techniques spécifiques aux produits ont une influence sur les facteurs d'émissions et sont donc pris en considération.

A propos du fret ferroviaire, l'évolution de son trafic annuel comme mode transport pour l'ensemble des commodités en France est en baisse de 20 % entre 2008 et 2014 (Soes, 2016). (Soes, 2016). Néanmoins, 28 % de son trafic est orienté vers l'international, ce qui est cohérent avec le rapport Efforwood qui souligne que la part modale du fret ferroviaire augmente pour les trajets supérieurs à 400 km.

Le transport fluvial représente une alternative marginale pour les divers produits-bois en France (Le Net *et al.*, 2011 ; ADEME 2016). La répartition modale du transport national et international des produits-bois en France démontre la prédominance du fret routier qui représente 92 % du trafic (en t.km), le reste étant assuré par le fret ferroviaire (Le Net *et al.*, 2011). Le transport fluvial représente une alternative marginale pour les divers produits-bois en France (Le Net *et al.*, 2011 ; ADEME 2016) et n'est donc pas pris en compte comme mode transport pour les exportations depuis la France au sein de l'Union Européenne.

Transport des produits-bois hors Europe : le Fret maritime

Le fret maritime est utilisé pour transporter 51 % de la valeur total des échanges mondiaux des produits ligneux (exprimé en dollars) et 82 % si l'on s'intéresse aux kilomètres parcourus selon le poids (exprimé en t.km) (Misak Avetisyan *et al.*, 2010). Pour les exportations vers des partenaires hors de l'Union Européenne, le transport maritime par conteneur ou vraquier sont les options considérées.

Facteurs d'émissions et distance

Le **Tableau 6** présente les caractéristiques des vecteurs de transports choisis selon les informations trouvées dans la littérature à ce sujet. Pour le transport routier et le fret ferroviaire, les données utilisées sont spécifiques au contexte français et proviennent de la base carbone (Ademe, 2018). Pour le fret maritime, les informations sont tirées de l'étude réalisée par l'Université nationale technique d'Athènes qui est une des plus exhaustives à propos des émissions de GES par type de navire (National Technical University of Athens, 2008). Les bois ronds sont considérés transportés par vraquier et le reste des produits-bois par navire porte-conteneur (Misak Avetisyan *et al.*, 2010).

A défaut de bénéficier d'informations détaillées sur la destination finale des produits, la distance prise est le trajet moyen réalisé en France pour chaque type de produits-bois (Elisabeth Le Net *et al.*, 2011), à laquelle s'ajoute la distance entre Paris et la capitale de chaque pays tiers. Les trajets routiers, ferroviaires et maritimes sont calculés selon les itinéraires disponibles pour le transport de marchandises²⁵.

²⁴ Décret n°2009-780 du 23 juin 2009 relatif au transport de bois ronds et complétant le code de la route.

²⁵ Les calculs d'itinéraires sont réalisés à partir du projet Marine Traffic (<https://www.marinetraffic.com/fr>) et le site portail des sociétés d'autoroutes (<http://www.autoroutes.fr/fr/itineraires.htm>).

Annexe B

Réconciliation des flux de matières à partir de faostat et facteurs de conversion

Pour cette étude, deux bases de données de FAOSTAT sont utilisées : *Forêt production et commerce* et *Flux du commerce*. Un travail de reconstitution des flux de matières de la filière forêt-bois française a été réalisé. Le détail des

catégories et sous-catégories utilisées pour la 4 est donné dans le **Tableau 7**.

Les facteurs de conversions utilisés sont listés dans le **Tableau 8**.

TABLEAU 7. CATÉGORIES DE LA BASE DE DONNÉES «FORÊT, PRODUCTION ET COMMERCE» DE FAOSTAT UTILISÉES POUR RECONSTITUER LA FILIÈRE FORÊT-BOIS FRANÇAISE

Bois d'œuvre	(1601/1604) « Grumes de sciage et placages »
Bois industrie	(1602/1603) « Bois de trituration »
Bois-énergie commercialisé	(1627/1628) « Bois de chauffage » + (1693) « granulés » + - 22 1000*
Sciage	(1632/1633) « Sciage »
Panneaux	(1634/1640/1647/1648/1650/1697) « panneaux dérivés du bois »
Pâte à papier	(1654/1655/1656/1667) « pâte de bois »

* Chiffre retenu pour l'autoconsommation (Agrete primeur, 2014)

TABLEAU 8. FACTEURS DE CONVERSION PAR CATÉGORIE DE PRODUITS-BOIS

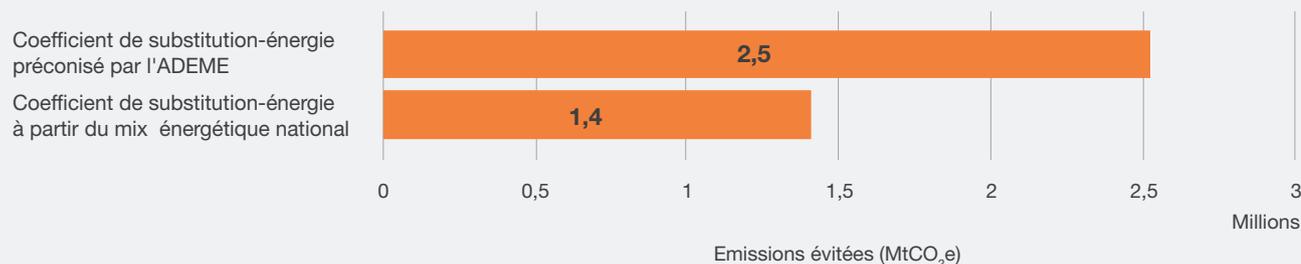
Coefficient	Valeur	Source
De bois non écorcé à bois écorcé	0,91	Communauté suisse pour le bois d'industrie
Granulés (m ³ .eq.br/tonnes)	2,3	FCBA, 2013
Charbon de bois (m ³ .eq.br/tonnes)	7	FCBA, 2013
Pâte à papier m ³ .eq.br/tonnes)	4,3	FCBA, 2018
Bois rond conifère (m ³ /tonnes)	0,41	(moyenne pin maritime, pin sylvestre, douglas, sapin-épicéa ; FCBA, 2018)
Bois rond feuillu (m ³ /tonnes)	0,51	(moyenne peuplier, hêtre châtaignier, chêne ; FCBA, 2018)
Sciage (tonnes/ m ³) (m ³ /tonnes)	0,68	(Enquête EAB d'Agrete)
Résidus (tonnes/ m ³) (m ³ /tonnes)	0,64	(Enquête EAB d'Agrete)
Panneaux (tonnes/m ³)	(V*42) /58,8	(Enquête EAB d'Agrete)
Pouvoir Calorifique du bois avec humidité de 30 % (t/tep)	0.43	FCBA, 2018

TABLEAU 9. PRINCIPAUX PARTENAIRES COMMERCIAUX (2011-2016)

Pays	Exportations	Importation
	Catégories de produits et volume (m ³)	
Allemagne	930 957 m ³ [Plaquettes et particules, panneaux, Bois ronds (NC et C), sciage, placage]	1 434 484 m ³ [Plaquettes et particules, panneaux, Bois ronds (NC et C), sciage, placage]
Algérie	70 113 m ³ [Sciage]	-
Autriche	-	45 667 m ³ [Panneaux]
Belgique	369 290 m ³ [Plaquettes et particules, Bois ronds (NC et C), sciage, panneaux, placage]	842 460 m ³ [Plaquettes et particules, Bois ronds (NC et C), sciage, panneaux, placage]
Brésil	-	52 002 m ³ [Plaquettes et particules de bois]
Canada	-	266 167 m ³ [Sciage]
Chine	2 309 336 m ³ [Bois ronds (NC et C), sciage, plaquettes et particules de bois, panneaux]	-
Espagne	570 118 m ³ [Bois rond (C et NC), sciage, panneaux]	499 538 m ³ [Plaquettes et particules, bois ronds (C et NC), et panneaux]
Etats-Unis	17 178 m ³ [Plaquettes et particules de bois]	57 667 m ³ [Plaquettes et bois rond feuillu]
Finlande	-	431 014 m ³ [Sciage]
Hongrie	-	9 500 m ³ [Bois rond NC]
Italie	948 574 m ³ [Plaquettes et particules, panneaux, Bois ronds (NC et C), sciage]	-
Luxembourg	170 843 m ³ [Plaquettes et particules, Bois ronds (NC et C)]	53 221 m ³ [Panneaux]
Maroc	58 582 m ³ [Sciage]	-
Pologne	-	150 667 m ³ [Bois rond C]
Pays-Bas	32 655 m ³ [Sciage et panneaux]	-
Royaume-Uni	38 965 m ³ [sciage]	-
Russie	9 833 m ³ [Panneaux]	321 590 m ³ [sciage]
Suède	-	313 511 m ³ [sciage]
Suisse	89 138 m ³ [Plaquettes et particules, panneaux]	266 410 m ³ [Bois rond conifère]

Annexe C Analyse de sensibilité du coefficient de substitution-énergie

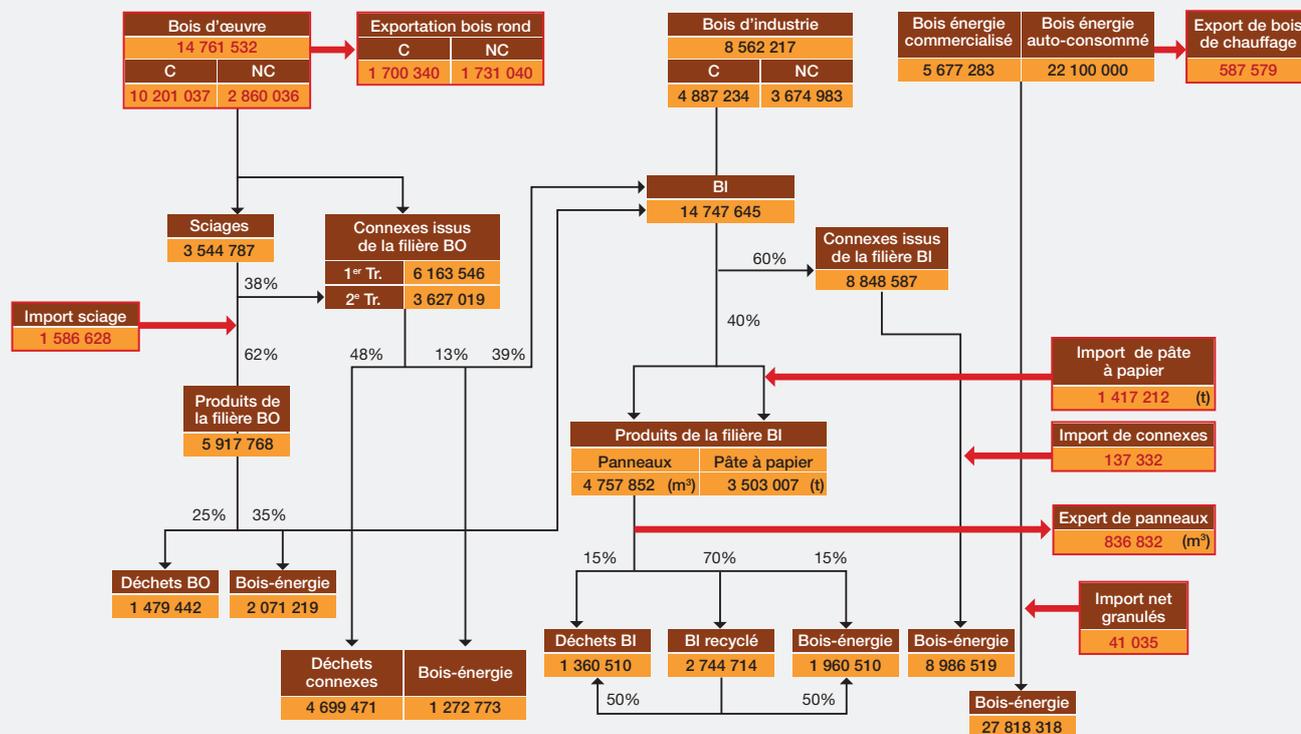
FIGURE 21. ANALYSE DE SENSIBILITE DU COEFFICIENT ENERGIE A PARTIR DU VOLUME DE PRODUITS-BOIS ENERGIE IMPORTE EN FRANCE



Source : calcul de l'auteur

Annexe D Diagramme de la filière bois pour les différents scénarios

FIGURE 22. DIAGRAMME DE FLUX DU SCENARIO « REDUCTION DES ECHANGES »



□ Variation apportée par le scénario

Les volumes sont exprimés en m³.

Source : réalisé par les auteurs à partir de Bicaiff et Faostat

FIGURE 23. DIAGRAMME DE FLUX DU SCENARIO «TRANSFORMATION LOCALE ET CONSOMMATION LOCALE»

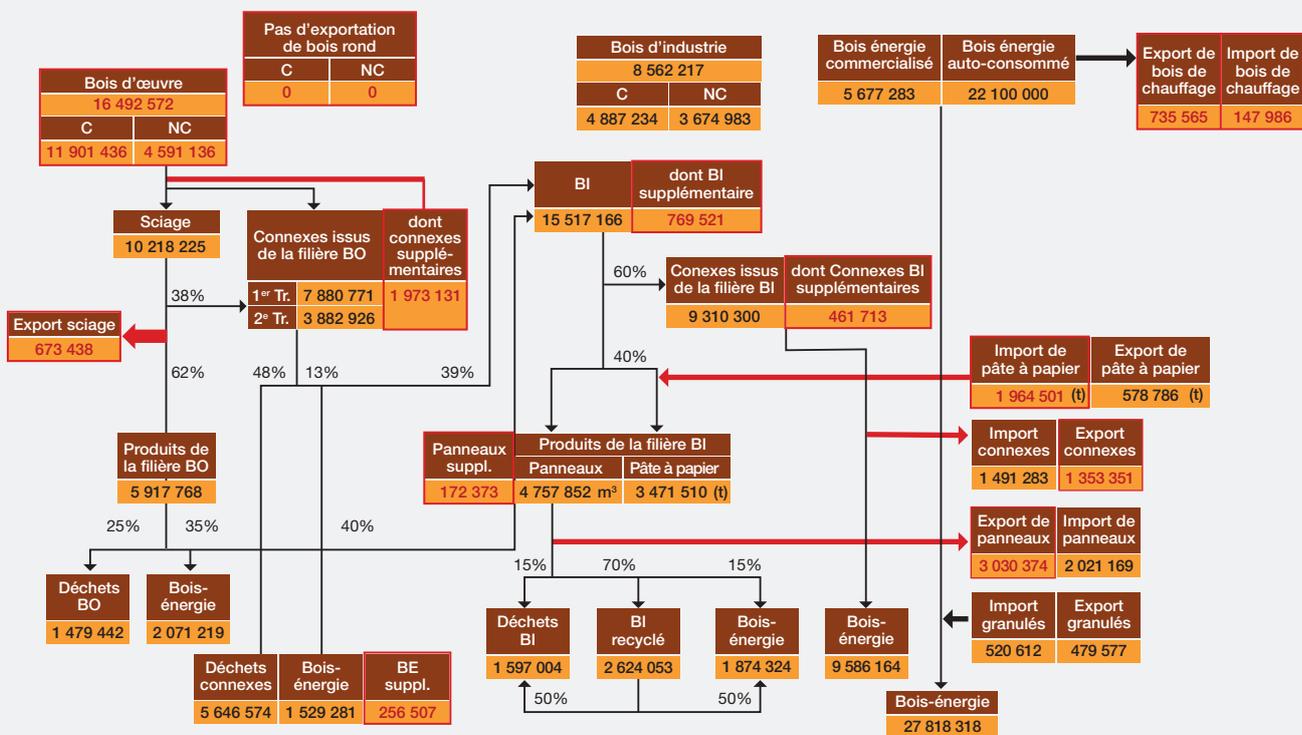
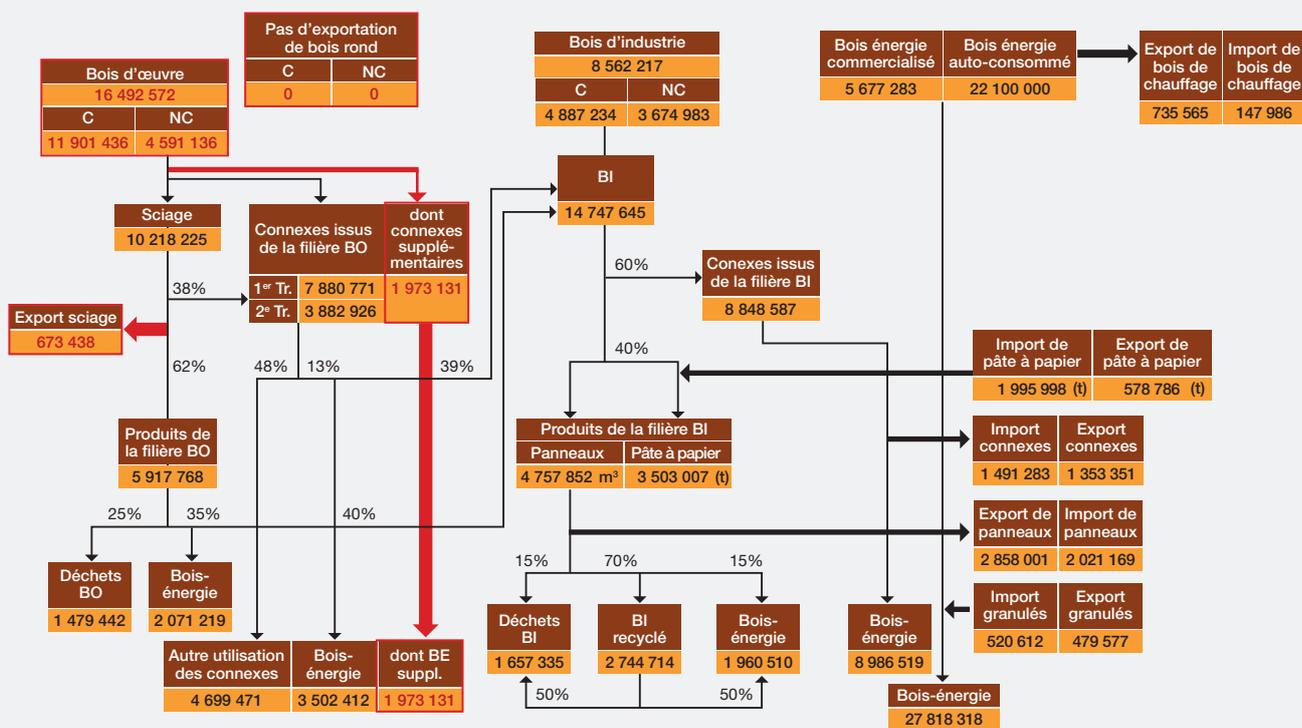


FIGURE 24. DIAGRAMME DE FLUX DU SCENARIO «TRANSFORMATION LOCALE ET BOIS-ENERGIE»



□ Variation apportée par le scénario

Source : réalisé par les auteurs à partir de Bicaft et Faosta

Les volumes sont exprimés en m³.



www.i4ce.org