

Analyse environnementale et économique des filières bois-énergie

Chloé Pelletier

▶ **To cite this version:**

Chloé Pelletier. Analyse environnementale et économique des filières bois-énergie. Milieux et Changements globaux. Université de Lorraine, 2017. Français. NNT : 2017LORR0331 . tel-01765854

HAL Id: tel-01765854
https://theses.hal.science/tel-01765854

Submitted on 13 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

THESE

Pour l'obtention du grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Spécialité Génie des procédés

Présentée par **Chloé Pelletier**

Analyse environnementale et économique des filières bois-énergie

Thèse soutenue publiquement le 12 décembre 2017 à Nancy devant le jury composé de

Valérie Laforest	Professeur, ENSMSE	Rapporteur
Caroline Sablayrolles	Maître de conférence, ENSIACET	Rapporteur
Roger Gadiou	Professeur, IS2M	Examinateur
Marie-Noëlle Pons	Directrice de recherche, CNRS – LRGP	Directrice de thèse
Anthony Dufour	Chargé de recherche, CNRS – LRGP	Co-directeur de thèse
Patrice Dumas	Chargé de recherche, CIRAD – CIRED	Examinateur
Thierry Brunelle	Chargé de recherche, CIRAD – CIRED	Invité

Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (LRGP)
UMR 7274 CNRS – Université de Lorraine
1 rue Grandville, 54000 NANCY

Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED)
UMR 8568 AgroParisTech – CIRAD – CNRS – Ecole des Ponts ParisTech – EHESS
Campus du Jardin Tropical
45bis avenue de la Belle Gabrielle, 94130 NOGENT-SUR-MARNE

Résumé

Le but de cette thèse est de conduire l'analyse environnementale et économique de plusieurs filières bois-énergie basée sur des technologies de combustion variées. Les bilans matière et énergie des filières s'appuient sur des modèles de croissance de la forêt, et sur des modèles de combustion basés sur les émissions de poêles et chaudières en conditions réelles. La croissance de la forêt est simulée pour le pin des Landes et le hêtre de Lorraine selon plusieurs itinéraires de gestion sylvicole. Les étapes de récolte, transformation, et transport, ainsi que les données économiques sont basées sur des données de la littérature. L'analyse environnementale compare les impacts calculés selon deux méthodes : ReCiPe et CML 2001. Une analyse dynamique de l'impact « Changement Climatique » complète la discussion sur les impacts environnementaux du bois-énergie. Enfin, une perspective plus large est ouverte avec une modélisation de l'usage des terres et des coûts de production de biomasse-énergie à l'échelle globale. Les résultats de l'Analyse de Cycle de Vie montrent l'importance à la fois de la qualité de la combustion (et donc de la technologie) et des étapes de transformation et de transport de la biomasse. Par exemple, les poêles et chaudières à granulés bénéficient de très bons rendements énergétiques mais sont pénalisés par l'étape de séchage de la biomasse, qui consomme des énergies fossiles. Ces équipements sont également beaucoup plus onéreux à installer que les poêles et chaudières à bûches. L'analyse dynamique montre que l'intensification des itinéraires forestiers par raccourcissement des cycles de croissance entraîne un impact supplémentaire qui n'est pas tout à fait compensé par l'augmentation de production des plantations.

Abstract

The objective of this thesis is to conduct the environmental and economic analysis of several wood-to-energy production chains based on various wood combustion technologies. The material and energy balances of the production chains are determined with modeling of forest growth and of wood combustion. The wood combustion models use the emission factors from real-scale experimental tests on stoves and boilers. Forest growth is modeled for maritime pine and beech plantations, according to several forest management schemes. The data on the harvest, transformation, and transport steps, as well as the economic data, were taken from the literature. The environmental analysis compares the impacts calculated by two methods: ReCiPe and CML 2001. A dynamic analysis of the "climate change" impact complements the discussion on the environmental impacts of energy wood. Finally, we open a broader perspective with modeling of land use and production costs of bioenergy on a global scale. The results of the Life Cycle Analysis show the importance of both combustion quality (linked to combustion technology), and the transformation and transport steps. For instance, pellet stoves and boilers have excellent efficiencies, but suffer from the consumption of fossil fuels to dry the biomass. These technologies are also much more expensive to buy than log stoves or boilers. The dynamic analysis shows that the intensification of wood production via the shortening of growth cycles leads to higher impacts that are not completely offset by the higher production rate.

Remerciements

Je remercie tout d'abord le Centre National de la Recherche Scientifique d'avoir soutenu financièrement ce travail, ainsi que le LRGP et le CIRED pour m'avoir accueillie dans leurs locaux.

J'adresse mes sincères remerciements à Valérie Laforest et Caroline Sablayrolles pour avoir accepté de rapporter cette thèse. Je remercie Roger Gadiou de se joindre à elles pour l'évaluer.

Je n'aurais pas pu accomplir ce travail sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes que je tiens à saluer chaleureusement ici. Tout d'abord mes directeurs de thèse, Anthony Dufour et Marie-Noëlle Pons, sans qui le projet ForêVEr n'aurait pas vu le jour. Je remercie en particulier Anthony pour son enthousiasme, son énergie débordante et son implication sans faille. Du côté du CIRED, Thierry Brunelle a été mon soutien principal, secondé des conseils avisés de Patrice Dumas.

Pour modéliser la croissance de la forêt et la filière bois, je me suis appuyée sur le travail conjoint de Mathieu Fortin du LERFoB et de l'équipe de Denis Loustau à l'INRA, en particulier Delphine Picart et Christophe Moisy.

Les modèles de combustion du bois sont basés sur les travaux de Jessica François, que je remercie beaucoup pour m'avoir transmis ses modèles et avoir pris le temps de m'en expliquer les rouages. Les données d'émissions des différents équipements m'ont été généreusement fournies par Yann Rogaume du Lermab. J'ai également beaucoup profité de l'aide de Roda Bounaceur et de Gérard Verdier pour diagnostiquer les erreurs dans mes programmes.

J'aimerais remercier également Léa Dieckhoff et Guillaume Bardeau, de l'European Institute For Energy Research, pour leur aide concernant la fiabilisation des données de l'analyse technico-économique.

J'en profite pour saluer tous mes compagnons de laboratoire : Yann Le Brech, Binod Shrestha, Airy Tilland, Jia Liangyuan, Felipe Buendia, Diego Pena, Hélène Lichère, Hélène Poirot, Guillain Mauviel, Michel Mercy, Francis Billaud, Gabriel Wild, Damien Remy, Maxime Hervy, Rémi Prudhomme, Yann Quilcaille, Ruben Bibas et j'en oublie probablement.

Enfin je remercie ma famille et mes amis pour leur soutien indéfectible pendant cette aventure. En particulier, je remercie ma tante Anne-Marie pour m'avoir hébergée. Sa compagnie m'a été très précieuse.

Table des matières

Table des illustrations 10
Figures 10
Tableaux 15
Liste des abréviations 17
Introduction 18
A. Etat de l'art 21
A - 1. Définition et composition de la biomasse 21
A - 1.1. Composition élémentaire de la biomasse ligno-cellulosique 21
A - 1.2. Composition moléculaire de la biomasse ligno-cellulosique 21
A - 1.2.1. Cellulose 22
A - 1.2.2. Hémicelluloses 22
A - 1.2.3. Lignine 23
A - 2. Voies de valorisation de la biomasse 24
A - 3. Filières de conversion thermochimique de la biomasse ligno-cellulosique 26
A - 3.1. Croissance du bois 26
A - 3.2. Récolte, séchage et transformation du bois 26
A - 3.3. Conversion énergétique de la biomasse 28
A - 3.4. Valorisation par combustion 29
A - 3.4.1. Technologies de combustion à petite échelle 32
A - 3.4.1.1. Cheminées et foyers fermés 32
A - 3.4.1.2. Poêles 32
A - 3.4.1.3. Cuisinières 32
A - 3.4.1.4. Chaudières de faible à moyenne puissance (<25 kW) 32
A - 3.4.2. Technologies de combustion à l'échelle industrielle 33
A - 3.4.2.1. Chaudières de forte puissance (jusqu'à 100 MW) 33
A - 3.4.2.2. Réseaux de chaleur 33
A - 3.4.2.3. Cogénération 34
A - 3.4.2.4. Cocombustion 35

A - 3.4.3. Capture et stockage de carbone 35
A - 3.4.4. Emissions polluantes liées à la combustion du bois 36
A - 4. Analyse de Cycle de Vie 39
A - 4.1. Méthodologie ACV 39
A - 4.1.1. Méthodologie générale 39
A - 4.1.1.1. Définition des limites du système et de l'unité fonctionnelle 40
A - 4.1.1.2. L'Inventaire de Cycle de Vie (ICV) 41
A - 4.1.1.3. L'évaluation des impacts 41
A - 4.1.1.4. L'interprétation des résultats 41
A - 4.1.2. ACV Attributionnelle et ACV conséquentielle 42
A - 4.1.3. Changement d'usage des sols direct et indirect 43
A - 4.1.4. ACV territoriale 46
A - 4.1.5. Impacts environnementaux potentiels : catégories mid-point et end-point 47
A - 4.1.6. Les méthodes ReCiPe et CML2001 47
A - 4.1.7. ACV dynamique 49
A - 4.1.7.1. Le problème de la comptabilisation du CO_2 en ACV 49
A - 4.1.7.2. L'approche ACV dynamique 50
A - 4.1.7.3. Approche ACV hybride 52
A - 4.2. Analyse des études ACV biomasse-énergie 53
A - 5. Modélisation de la filière bois-énergie 56
A - 5.1. Modélisation de la croissance forestière 56
A - 5.1.1. Les modèles forestiers dans la littérature 56
A - 5.1.1. Modélisation de la croissance de la forêt avec le modèle GO+ 57
A - 5.1.2. Modélisation de la transformation du bois avec l'outil CAT (Carbon Assessment Tool) 58
A - 5.2. Modélisation de la combustion du bois 58
A - 6. Analyse économique 60
A - 6.1. Analyse micro-économique 60
A - 6.2. Analyse macro-économique 61
A - 6.2.1. Potentiel de production de la biomasse-énergie 62

A - 6.2.2. Courbes d'offre 66
A - 6.2.3. Analyse économique mondiale 66
B. Présentation synthétique de la méthodologie 69
C. Modélisation de la filière bois-énergie (bilan matière et énergie) 72
C - 1. Production des combustibles bois 72
C - 1.1. Le Pin Maritime dans les Landes 72
C - 1.1.1. Couplage des modèles GO+ et CAT 72
C - 1.1.2. Scénarios de changement climatique et itinéraires sylvicoles testés 74
C - 1.1.3. Résultats 75
C - 1.2. Le Hêtre Commun en Lorraine 79
C - 1.2.1. Croissance de la forêt 79
C - 1.2.2. Récolte et transformation du bois 80
C - 2. Modélisation de la combustion du bois 80
C - 2.1. Unité fonctionnelle et scénarios étudiés 80
C - 2.2. Combustion du bois 82
C - 2.2.1. Modèle de combustion Aspen Plus® 82
C - 2.2.2. Calcul des émissions 84
C - 2.3. Résultats de la modélisation de la combustion du bois 87
C - 3. Résultats d'ICV sur l'ensemble de la filière 90
D. Analyse technico-économique 95
D - 1. Données relatives au coût des équipements et combustibles 95
D - 2. Résultats de l'analyse technico-économique 98
E. Evaluation des impacts 100
E - 1. ACV statique 100
E - 1.1. Représentation des scénarios sous GaBi® 100
E - 1.2. Impacts environnementaux – calcul par la méthode ReCiPe 101
E - 1.3. L'impact Changement Climatique 105
E - 2. ACV dynamique 110

E - 2.1. Méthode de calcul du potentiel de réchauffement dynamique 110
E - 2.2. Pin 110
E - 2.2.1. Hypothèses de calcul des émissions annuelles 110
E - 2.2.2. Résultats de l'ACV dynamique sur le pin 110
E - 2.3. Hêtre 112
E - 2.3.1. Hypothèses de calcul des émissions annuelles 112
E - 2.3.2. Résultats de l'ACV dynamique sur le hêtre 114
E - 3. Conclusions de l'analyse ACV 117
F. Analyse économique à l'échelle mondiale 119
F - 1. Analyse statistique des coûts de production de la biomasse 120
F - 1.1. Frontières de l'analyse statistique 120
F - 1.1.1. Catégories de biomasse 120
F - 1.1.2. Critères de recherche 121
F - 1.1.3. Harmonisation des coûts 121
F - 1.1.4. Extrait statistique des résultats 121
F - 1.1.5. Fonction de répartition des données 123
F - 1.2. Forêts / plantations 123
F - 1.2.1. Distribution du coût total de la biomasse 123
F - 1.2.2. Répartition par étape de production et poste de coût 124
F - 1.2.3. Mise au point de la fonction de répartition des coûts de forêts pour intégration dans le modèle 126
F - 1.3. Taillis à Courte Rotation (TCR) 129
F - 1.3.1. Distribution du coût total de la biomasse 129
F - 1.3.2. Répartition par étape de production et poste de coût 130
F - 1.4. Cultures énergétiques annuelles 131
F - 1.4.1. Distribution du coût total de la biomasse 131
F - 1.4.2. Répartition par étape de production et par poste de coûts 132
F - 2. Modélisation économique 133

F - 2.1. Présentation du modèle NLU (Nexus Land-Use) 133
F - 2.1.1. Structure et fonctionnement du modèle 134
F - 2.1.2. Scénarios globaux 134
F - 2.1.3. Régionalisation 136
F - 2.1.4. Distribution de rendements 137
F - 2.1.5. Allocation de terres et rente foncière 139
F - 2.1.5.1. Courbes d'offre régionales pour les forêts et les cultures dédiées 140
F - 2.1.5.2. Courbes d'offre régionales agrégées 143
F - 2.1.5.3. Répartition de la production entre régions et sources de biomasse 144
F - 2.2. Résultats 145
F - 2.2.1. Courbes d'offre de la biomasse-énergie 145
F - 2.2.2. Production de biomasse-énergie à l'horizon 2050 150
G. Conclusion 155
H. Perspective 158
Références 159
Annexes 174
Annexe I. Publications et interventions orales 174
Articles publiés 174
Interventions en conférence 174
Annexe II. Analyses ACV sur la biomasse-énergie dans la littérature 175
Annexe III. Détails du modèle de combustion Aspen Plus® 182
Annexe IV. Plans des scenarios analysés sous GaBi® 183
Annexe V. Résultats détaillés de l'ACV GaBi® 189
Annexe VI. Revue de littérature sur les coûts de production de la biomasse-énergie – données détaillées 196

Table des illustrations

Figures

Figure 1: Le projet ForêVEr: objectifs, partenaires de recherche 20
Figure 2: Structure chimique de la cellulose 22
Figure 3: Structure moléculaire des principaux sucres constituant les hémicelluloses [El Hage, 2010] 23
Figure 4: Structure moléculaire des trois unités de la lignine 23
Figure 5: Les différentes voies de valorisation de la biomasse 25
Figure 6: Les voies thermochimiques de valorisation de la biomasse 28
Figure 7: Réactions principales durant la combustion de la biomasse avec apport d'air primaire et secondaire [Nussbaumer, 2003] 29
Figure 8: Schéma de principe a) d'un foyer à grille fixe et b) d'un système avec avant foyer [Rogaume, 2005a] 30
Figure 9: Schéma de principe d'un réseau de chaleur [Rogaume, 2005b] 34
Figure 10: Emissions de CO de différents appareils, rapportés en unité d'énergie entrante [Collet, 2009] 36
Figure 11: Les étapes de l'Analyse de Cycle de vie [ADEME, 2005] 40
Figure 12: Illustration d'un procédé théorique et des activités qui peuvent être indirectement affectées par un changement de la demande en produit A dans le système étudié (à partir de [Ekvall & Weidema, 2004]) 42
Figure 13: Cycle du carbone des écosystèmes agricoles ou forestiers montrant les flux de carbone entrant et sortant du système ainsi que entre les 5 compartiments du système [IPCC, 2006] 44
Figure 14: Emissions de GES de biodiesel à base d'huile de palme - simulations de l'impact potentiel du changement d'affectation des sols (CAS) [ADEME, 2010a] 45
Figure 15: Etapes de l'ACV Territoriale Spatialisée (à partir de [Nitschelm et al., 2016]) 47
Figure 16: Incertitudes des modèles d'analyse des impacts à mi-parcours et finaux, exemple du changement climatique issu de la méthode ReCiPe [Aissani et al., 2012] 47
Figure 17: Part de gaz restant dans l'atmosphère au cours du temps, pour une émission à t=0 (CO_2, CH_4, CO), à partir de [IPCC, 2013] 50
Figure 18: Potentiel Absolu de Réchauffement Climatique pour l'émission de 1 kg de CO_2 à t=0, à partir de [IPCC, 2013] 51
Figure 19: Potentiel Absolu de Réchauffement Climatique pour l'émission de 1 kg de CH_4 ou de CO à t=0, à partir de [IPCC, 2013] 51

Figure 20: (a) Flux de CO_2, (b) Potentiel de Changement de Température Instantané et (c) Potentiel de Changement de Température cumulé pour la production de 1MWh d'énergie thermique suivant 3 scénarios d'exploitation de résidus forestiers [Guest et al., 2013] 54
Figure 21: La forêt comme procédé dans le modèle GO+ 57
Figure 22: Principe de couplage d'un modèle Aspen Plus avec des fichiers FORTRAN extérieurs (d'après [Abdelouahed et al., 2012]) 59
Figure 23: Potentiel technique mondial de biomasse-énergie à l'horizon 2050, pour les principales catégories de ressource, d'après [Creutzig et al., 2015] 62
Figure 24: Courbe d'offre (année 2050) des carburants diesel issus de cultures énergétiques produites sur des terres agricoles abandonnées et des terres en jachère, pour quatre scénarios de développement économique mondial [Hoogwijk et al., 2009] 66
Figure 25: Limites du système étudié, flux entrants et sortants 70
Figure 26: Plan de travail de l'ACV 70
Figure 27: Modélisation de la production de pin maritime par les modèles GO+ et CAT 72
Figure 28: Couplage informatique des modèles GO+ et CAT 73
Figure 29: Production Primaire Nette de la forêt landaise selon l'itinéraire sylvicole extensif (scénario climatique RCP2.6) 76
Figure 30: Produits bois issus de la forêt landaise entre 2006 et 2100 selon les différents scénarios climatiques et techniques 77
Figure 31: Stock de carbone dans le sol du massif forestier landais sous différents scénarios climatiques et de gestion sylvicole 78
Figure 32: Croissance d'un hêtre et absorption de CO_2 au cours du temps 79
Figure 33: Besoins mensuels en chauffage et eau chaude pour un foyer de 4 personnes occupant une maison RT2005 de 100m^2 en Lorraine 80
Figure 34: Modèle de combustion du bois sous Aspen Plus® 83
Figure 35: Calcul des émissions de combustion du bois par le modèle Aspen/FORTRAN 86
Figure 36: Décomposition par poste du coût moyen annualisé pour l'usager de chaque scénario (chauffage te production d'eau chaude sur un an, maison RT2005 de 100m^2 en Lorraine, 4 habitants) 99
Figure 37: Représentation sous GaBi® du scénario Chaudière à granulés 100
Figure 39: Impacts Epuisement des énergies fossiles et des métaux des différents scénarios selon la méthode ReCiPe (UF: chauffage et production d'eau chaude sur un an pour une maison de 100 m^2 en Lorraine, 4 occupants) 103
Figure 40: Impact Ecotoxicité des différents scénarios selon la méthode ReCiPe (UF: chauffage et production d'eau chaude sur un an pour une maison de 100 m2 en Lorraine, 4 occupants) 103

Figure 41: Impact Toxicité pour l'Homme des différents scénarios selon la méthode ReCiPe (UF: chauffage et production d'eau chaude sur un an pour une maison de 100 m2 en Lorraine, 4 occupants) 104
Figure 38: Poids de chaque étape dans les impacts environnementaux du scénario « chaudière à granulés » (S5) 105
Figure 42: Impact Changement Climatique des différents scénarios selon la méthode ReCiPe (UF: chauffage et production d'eau chaude sur un an pour une maison de 100 m^2 en Lorraine, 4 occupants) 106
Figure 43: Variation de l'impact Changement Climatique lié aux polluants mineurs selon la méthode d'évaluation des impacts , scénario « poêle à bûches » (S2) 107
Figure 44: Impact changement climatique des différents scénarios (méthode ReCipe et CML 2001)108
Figure 45: Potentiel de changement climatique relatif au coût pour l'usager (méthodes ReCiPe et CML2001) 109
Figure 46: Méthode de calcul de l'impact dynamique sous Excel - exemple du CO_2 110
Figure 47: Potentiel de réchauffement absolu pour les six scénarios de croissance de la forêt landaise 111
Figure 48: Production Primaire Nette du massif forestier landais dans les 6 scénarios étudiés 112
Figure 49: Profil d'absorption de CO_2 pour une parcelle homogène de hêtre dans trois scénarios sylvicoles 113
Figure 50: Potentiel absolu de réchauffement climatique pour les trois scénarios de hêtre 114
Figure 51: Potentiel de réchauffement climatique par unité d'énergie produite 115
Figure 52: Potentiel Absolu de réchauffement climatique - avec combustion initiale de la biomasse 115
Figure 53: Illustration de l'influence de la temporalité sur les résultats d'une ACV dynamique 116
Figure 54: Comparaison des distributions de coûts pour les trois catégories de biomasse (graphique en boxplot) 122
Figure 55: Coûts de production des forêts: répartition des données 124
Figure 56: Coûts de production des forêts et plantations - répartition par étape de production 124
Figure 57: Coûts de production des forêts et plantations - répartition par poste 126
Figure 58: Illustration du test de Kolmogorov-Smirnov (D(F)=0.109) 128
Figure 59: Coûts de production des forêts : distribution statistique des données et distribution retenue 129
Figure 60: Coûts de production des Taillis à Courte Rotation : distribution statistique des données et loi normale 129
Figure 61: Coûts de production des Taillis à Courte Rotation - répartition par étape de production 130

Figure 62: Coûts de production des Taillis à Courte Rotation - répartition par poste 130
Figure 63: Coûts de production des cultures énergétiques : distribution statistique des données et loi normale 131
Figure 64: coûts de production des cultures énergétiques - répartition par étape de production 132
Figure 65: Coûts de production des cultures énergétiques - répartition par poste 132
Figure 66: Schéma de principe du Nexus Land-Use 134
Figure 67: Scénario démographique et alimentaire à l'horizon 2100 135
Figure 68: Profil de la taxe carbone, lorsqu'elle est appliquée 135
Figure 69: Les 12 régions du Nexus Land-Use (Rest of LAM : Amérique Latine hors Brésil; Brazil : Brésil; FSU : ancien bloc soviétique; Middle-East : Moyen-Orient ; Africa : Afrique ; India : Inde ; China : Chine ; Rest of Asia : Asie hors Chine et Inde ; OECD Pacific : Australie, Nouvelle-Zélande).. 136
Figure 70: Distribution des rendements de terres dans les 12 régions du modèle NLU [Souty et al., 2012]..... 138
Figure 71: Rente différentielle (a) et rente de rareté (b) 142
Figure 72: Calcul des courbes d'offre régionales agrégées 143
Figure 73: Répartition de la production régionale entre forêts et cultures dédiées en fonction de la demande..... 144
Figure 74: Courbe d'offre des forêts gérées en 2050, en présence d'une taxe carbone à 48$/tonne$CO_2$eq..... 145
Figure 75: Courbes d'offre régionales pour les forêts et les TCR (courbes tracées en 2050, avec une taxe carbone à 48$/tonne$CO_2$eq.) 147
Figure 76: Courbe d'offre des TCR en 2050, en présence d'une taxe carbone à 48$/tonne$CO_2$eq. ... 148
Figure 77: Courbes d'offre des Taillis à Courte Rotation en 2050, avec et sans taxe carbone 149
Figure 78: Rente foncière en Afrique en présence d'une taxe carbone, en part de la rente sans taxe carbone..... 150
Figure 79: Production mondiale de bois énergie par les forêts gérées sous trois scénarios de demande, avec et sans taxe carbone 150
Figure 80: Production de bois énergie par les taillis à courte rotation sous trois scénarios de demande, avec et sans taxe carbone 151
Figure 81: Modèle de combustion du bois sous Aspen Plus® 182
Figure 82: Plan GaBi - scénario poêle à bûches..... 183
Figure 83: Plan GaBi - scénario chaudière à bûches..... 184
Figure 84: Plan GaBi - scénario poêle à granulés 185
Figure 85: Plan GaBi - scénario chaudière à granulés 186
Figure 86: Plan GaBi - scénario réseau de chaleur à plaquettes forestières..... 187

Figure 87: Plan GaBi - scénario réseau de chaleur au gaz naturel 187
Figure 88: Plan GaBi - scénario chaudière individuelle au gaz naturel 188
Figure 89: Plan GaBi - scénario chaudière individuelle au fioul 188
Figure 90: Plan GaBi - scénario chauffage électrique..... 188

Tableaux

Tableau 1: Composition atomique du bois de hêtre 21
Tableau 2: Composition chimique massique de la biomasse ligno-cellulosique, d'après [Sun & Cheng, 2002] 22
Tableau 3: Données de consommation issues de la littérature pour les étapes de récolte, de transformation et de transport des arbres 27
Tableau 4: Récapitulatif de différentes technologies de combustion du bois, à partir de [Nussbaumer, 2003] 31
Tableau 5: Avantages et inconvénients de la cocombustion du bois [Rogaume, 2005b] 35
Tableau 6: Emissions polluantes de deux appareils de type insert/foyer fermé [Robert, 2006] 37
Tableau 7: Séquestration de carbone dans différentes catégories de terres ([ADEME, 2010a], synthétisé d'après les calculs du GIEC) 45
Tableau 8: Catégories d'impacts mid-point et unités pour les méthodes ReCiPe et CML2001 48
Tableau 9: Valeur des paramètres pour la somme d'exponentielles décrivant la fraction restante de CO_2 dans l'atmosphère après une émission ponctuelle [IPCC, 2013] 49
Tableau 10: Impact changement climatique des réseaux de chaleur à bois dans la littérature 54
Tableau 11: Revue de littérature des modèles de potentiel de bioénergie mondial 63
Tableau 12: Caractéristiques des itinéraires de gestion extensif et intensif de la forêt landaise 75
Tableau 13: Polluants issus de la combustion du bois pour différentes technologies, d'après des essais à échelle réelle [Rogaume, 2008, 2010] 84
Tableau 14: HAPs représentatifs 85
Tableau 15: ICV de la phase de combustion du bois – entrants 87
Tableau 16: ICV de la phase de combustion du bois – sortants 89
Tableau 17: ICV des différents scénarios de chauffage (UF: chauffage et production d'eau chaude sur un an - maison RT2005 de 100 m^2 en Lorraine, 4 habitants): entrants 91
Tableau 18: Emissions de la phase de combustion du bois pour les différents scénarios de chauffage (UF: chauffage et production d'eau chaude sur un an - maison RT2005 de 100 m^2 en Lorraine, 4 habitants) 92
Tableau 21: Fiches EcoInvent utilisées 94
Tableau 19: Données technico-économiques sur les différents scénarios 97
Tableau 20: Prix des combustibles pour particuliers et chaufferies collectives 98
Tableau 22: Production de bois et émissions des trois itinéraires sylvicoles d'une parcelle homogène de hêtre 114

Tableau 23: Statistiques des valeurs issues de la revue de littérature sur les coûts de production de biomasse..... 122
Tableau 24: Coûts de production de plaquettes forestières pour différents sites et méthodes [Kent et al., 2011]..... 125
Tableau 25: Paramètres optimaux de la loi de distribution normale asymétrique tronquée 127
Tableau 26: Coût de production des TCR retenu pour chaque région du NLU..... 141
Tableau 27: Production de bioénergie par région et type de biomasse, pour les 6 scénarios..... 151
Tableau 28: Etudes ACV portant sur l'utilisation de la biomasse comme source d'énergie..... 175
Tableau 29: Blocs du modèle de combustion Aspen Plus..... 182
Tableau 30: Résultats ACV détaillés - poêle à bûches (S2)..... 189
Tableau 32: Résultats ACV détaillés - poêle à granulés (S3) 190
Tableau 31: Résultats ACV détaillés - chaudière à bûches (S4)..... 191
Tableau 33: Résultats ACV détaillés - chaudière à granulés (S5) 192
Tableau 34: Résultats ACV détaillés - réseau de chaleur au bois (S8)..... 193
Tableau 35: Impacts de l'étape transport des plaquettes sur 100 et 150 km..... 194
Tableau 36: Résultats ACV détaillés - scénarios fossiles et électrique..... 195
Tableau 37: Revue de littérature sur les coûts de production de la biomasse-énergie 196

Liste des abréviations

ACV – Analyse de Cycle de Vie

CIRED – Centre International de Recherche en Environnement et Développement

CNRS – Centre National pour la Recherche Scientifique

COV – Composés Organiques Volatils

COVNM – COV non méthaniques

EIFER – European Institute for Energy Research

ForêVER – Forêts, biomasses et leurs filières durables de valorisation énERgétique

GES – Gaz à Effet de Serre

GIEC – Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

HAP – Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

HR – Humidité Relative

ICV – Inventaire de Cycle de Vie

INRA – Institut National pour la Recherche Agronomique

LERFoB – Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois

LERMAB – Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois

LRGP – Laboratoire Réactions et Génie des Procédés

NOx – Oxydes d'azote

PCI – Pouvoir Calorifique Inférieur

PIB – Produit Intérieur Brut

RCP – Representative Concentration Pathway

RT2005 – Réglementation Thermique 2005

SSP – Shared Socio-economic Pathway

TCR – Taillis à Courte Rotation

UF – Unité Fonctionnelle

Introduction

Depuis les années 70 et 80, les populations et les gouvernements sont de plus en plus préoccupés par les questions écologiques et notamment les questions de durabilité. Le développement durable est défini comme devant « répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » [Brundtland, 1987]. La durabilité demande donc d'éviter toute dégradation irréversible de la planète qui entraînerait une perte de qualité de vie pour les générations à venir.

Or, il est avéré que les activités humaines et les émissions de certains gaz qui en résultent entraînent une augmentation de l'effet de serre et une modification du climat. Le lien entre ces activités et le réchauffement planétaire est établi clairement depuis 2007 dans le quatrième rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) [GIEC, 2007]. Les conséquences du changement climatique sont nombreuses : hausse du niveau des océans, déséquilibre des écosystèmes, disparition d'espèces, etc. Le changement climatique est donc devenu un enjeu politique important, d'autant que les pays les plus susceptibles d'être affectés négativement par les effets du changement climatique peuvent être ceux qui ont le moins contribué aux émissions de gaz à effet de serre jusque-là.

L'accord de Paris, adopté le 12 décembre 2015 lors de la 21ème Conférence des parties (COP21), a fixé un objectif de réduction du réchauffement à 2°C par rapport aux niveaux préindustriels (1800-1900) [UNFCCC, n.d.]. Il nécessitera à la fois des réductions de la consommation énergétique, des améliorations technologiques, et une importante transition énergétique, des combustibles fossiles aux énergies renouvelables : solaire, éolien, hydraulique, et biomasse.

La biomasse est intéressante à plusieurs égards. D'abord, contrairement aux autres énergies renouvelables, elle se prête à un grand nombre de transformations et peut produire de l'énergie sous des formes variées : chaleur, électricité, gaz de synthèse, carburants liquides. De plus, durant sa phase de croissance, la biomasse absorbe du dioxyde de carbone (CO_2), le principal gaz à effet de serre de notre atmosphère. Elle compense ainsi une partie des émissions positives liées à son exploitation et sa conversion en énergie.

Mais l'exploitation de la biomasse soulève également un certain nombre de problèmes liés aux coûts de production, au développement technologique des filières, aux changements positifs et négatifs qu'elle peut entraîner dans l'agriculture, la société etc., et bien sûr aux impacts environnementaux des filières. Ces impacts peuvent être difficiles à évaluer, en particulier les impacts indirects comme ceux dus au changement d'usage des sols. Ainsi, les agro-carburants de 1ère génération, dont les premiers bilans étaient très prometteurs, ont vu leur empreinte carbone augmenter fortement dès

que les changements d'usage des sols ont été inclus dans les analyses [FAO, 2008; Searchinger et al., 2008].

Cette thèse se concentre sur la biomasse ligno-cellulosique, parfois appelée biomasse de 2ème génération. Les espèces ligno-cellulosiques présentent l'avantage d'être convertibles dans leur intégrité et en multiples formes d'énergie. Elles sont au centre de l'intérêt politique depuis qu'il a été démontré que les carburants de 1ère génération avaient un bilan environnemental peu intéressant.

Ce travail s'intéresse au rôle de la biomasse dans la transition énergétique. Il est intéressant de remarquer que, selon l'échelle spatiale et temporelle à laquelle on s'intéresse, différentes questions se posent. Au niveau national ou régional, l'analyse est consacrée plutôt à des questions techniques cherchant à améliorer le bilan environnemental des filières et à réduire les coûts de production.

Les défis présentés changent lors de la montée en échelle. Si la biomasse-énergie doit jouer un rôle important dans la lutte contre le changement climatique, il devient nécessaire de mettre en place des filières de production à haut rendement, comme les Taillis à Courte Rotation ou les cultures d'herbes géantes, qui à l'heure actuelle sont encore au stade pilote. A cette échelle, les effets indirects du développement de la bioénergie se font également beaucoup plus sentir, par exemple la compétition avec l'usage alimentaire des terres, le changement d'usage des sols etc.

La directive Energies Renouvelables de l'Union Européenne a entraîné une hausse du recours aux énergies renouvelables et notamment à la biomasse dans l'Union [Parlement Européen, 2009]. En France par exemple, le nombre de chaufferies au bois a plus que quadruplé entre 2002 et 2012, notamment grâce au Fond Chaleur créé par la loi Grenelle 1 [Assemblée Nationale, 2009] et géré par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) [AMORCE/ADEME, 2013]. Mais le développement du bois-énergie est-il vraiment intéressant pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, et quel est son coût ? Pour répondre à ces questions, il est important de considérer les filières bois-énergie dans leur ensemble, et notamment d'intégrer dans l'analyse l'étape de croissance de la forêt, qui peut avoir un effet important sur les impacts de la filière.

Une autre question intéressante est soulevée, à savoir celle des conséquences d'une exploitation plus intensive des forêts. En règle générale, les forêts jeunes absorbent plus de carbone que les forêts matures ; on pourrait donc faire l'hypothèse qu'une intensification de l'exploitation forestière, notamment par le raccourcissement des cycles de croissance, permettrait une plus forte absorption tout en fournissant plus de bois-énergie. Pour tester cette hypothèse, il est nécessaire d'étudier en détail la croissance de la forêt selon différents scénarios de gestion sylvicole.

Enfin, si la biomasse-énergie doit se développer à l'échelle globale pour substituer des énergies fossiles et atténuer le changement climatique, quelle serait la forme de production la plus efficace ?

Quelles régions du globe seraient les principaux producteurs ? Quels effets aurait cette production sur la rente foncière, les prix des denrées alimentaires, etc. ?

Cette thèse a pour objectif de déterminer le bilan matière et énergie sur l'ensemble de la filière forêt-énergie et d'évaluer les impacts d'une intensification de l'exploitation des forêts. Deux régions productrices de bois sont étudiées : les Landes et la Lorraine. On modélise la croissance du pin maritime et du hêtre commun, respectivement. La filière bois est ensuite caractérisée d'après les données de la littérature jusqu'à l'arrivée chez l'utilisateur final, où la combustion est modélisée pour cinq technologies différentes dans un logiciel de modélisation de procédés. Une Analyse de Cycle de Vie est menée sur les différents scénarios, et comparée aux impacts de scénarios fossiles équivalents. En complément de l'Analyse de Cycle de Vie classique, une ACV dynamique et une analyse micro-économique sont menées. Enfin, pour élargir la perspective sur la biomasse-énergie, un chapitre est consacré à une analyse économique globale du déploiement de la biomasse-énergie sous certaines hypothèses.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet FORêVER (FORêts, biomasses et leurs filières durables de Valorisation énERgétique). Le projet FORêVER a été financé par la Mission pour l'Interdisciplinarité du CNRS dans le cadre du défi « Transition énergétique : ressources, société, environnement ». Il rassemble plusieurs partenaires de recherche aux spécialités variées dans l'objectif d'étudier les filières bois-énergie à plusieurs échelles et sur l'ensemble de la chaîne de production.

*Le projet comporte plusieurs objectifs: tout d'abord fiabiliser les bilans matière et énergie de la filière bois-énergie, via la modélisation à plusieurs étapes de la chaîne; ensuite faire une analyse économique à l'échelle de la filière, puis élargir cette analyse à l'échelle mondiale; enfin réaliser l'analyse de cycle de vie de ces filières (*Figure 1*). Cette thèse couvre les trois objectifs pour les filières de combustion de la biomasse.*

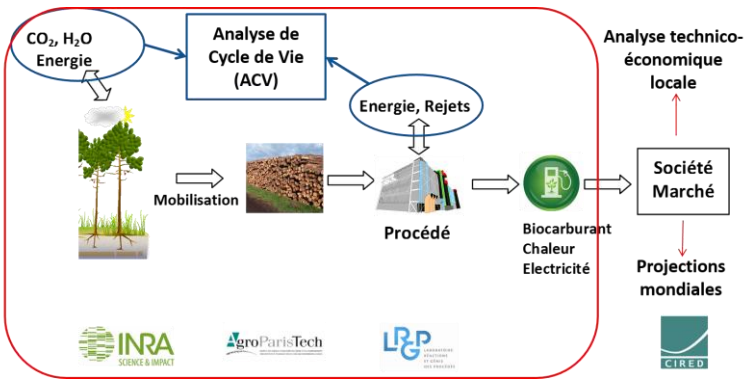


Figure 1: Le projet ForêVEr: objectifs, partenaires de recherche

A. Etat de l'art

A - 1. Définition et composition de la biomasse

L'Agence Internationale de l'Energie définit la biomasse comme toute matière organique (i.e. décomposable) issue des plantes ou des animaux et disponible de manière durable [IEA, n.d.]. La biomasse inclut le bois, les plantations agricoles, la phase organique des déchets et également les lisiers et fumiers.

Dans cette thèse, nous nous sommes principalement intéressés à la biomasse ligno-cellulosique. C'est pourquoi nous décrivons plus particulièrement sa composition.

A - 1.1. Composition élémentaire de la biomasse ligno-cellulosique

La biomasse ligno-cellulosique telle que les herbes géantes (miscanthus, bambou), pailles, arbustes, arbres, etc. est principalement composée de Carbone, Oxygène et Hydrogène, avec moins de 1% de minéraux (azote, calcium, potassium, magnésium, phosphore ; silice dans certains bois tropicaux).

Les concentrations en éléments C, H, O varient assez peu d'une biomasse ligno-cellulosique à une autre. Le carbone reste en général l'élément le plus abondant en masse (~50%) suivi par l'oxygène

(~40%) et l'hydrogène (~6%). L'azote et le soufre ne représentent qu'une part très faible (~1,5%). Le Tableau 1 présente la composition atomique du bois de hêtre (hors minéraux) [Melkior et al., 2012].

Tableau 1: Composition atomique du bois de hêtre

Hêtre	C	H	N	O (calculé par différence)
% de la masse anhydre sans cendres	46,1	6,2	0,1	47,6

A - 1.2. Composition moléculaire de la biomasse ligno-cellulosique

La biomasse ligno-cellulosique est principalement composée de macromolécules de sucres (cellulose et hémicelluloses) et de lignine, un polymère phénolique. Elle contient également jusqu'à 10% en masse d'extractibles organiques. Le terme d'extractibles est générique et désigne des "composés de faible poids moléculaire que l'on trouve dans la structure poreuse du bois", que l'on peut "extraire avec les solvants organiques ou l'eau, sans procéder à des traitements sévères qui modifient chimiquement les constituants structuraux du bois" [Stevanovic & Perrin, 2009]. Les tanins, très importants dans la fabrication de vins et spiritueux, sont un exemple de famille d'extractibles du bois.

La part massique de chacun des composés est variable selon l'espèce, la cellulose restant le composant majoritaire (Tableau 2).

Tableau 2: Composition chimique massique de la biomasse ligno-cellulosique, d'après [Sun & Cheng, 2002]

	Cellulose	Hémicelluloses	Lignine
Bois dur	40-55%	24-40%	18-25%
Bois tendre	45-50%	25-35%	25-35%
Pailles	30-43%	22-35%	15-23%
Herbes	25-40%	35-50%	10-30%

A - 1.2.1. Cellulose

La Figure 2 présente la structure chimique de la cellulose. Il s'agit d'un homopolymère linéaire de glucose cyclique de configuration β (anhydroglucopyranose). Structuralement, l'unité élémentaire qui se répète est en réalité le cellobiose, un dimère de glucose [ADEME, 2015].

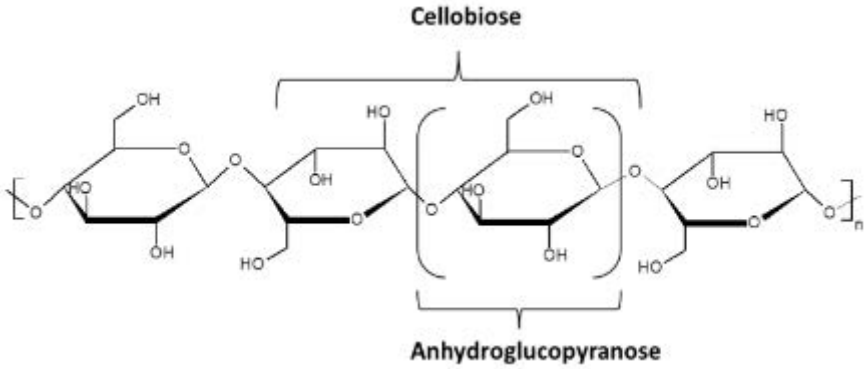


Figure 2: Structure chimique de la cellulose

Les chaînes de cellulose sont liées par des liaisons hydrogène entre groupements hydroxyles et forment des faisceaux appelés microfibrilles. Dans la microfibrille, par endroits, les chaînes de cellulose sont liées par des liaisons hydrogène de manière ordonnée et périodique et forment alors un motif cristallin. Dans les parties amorphes, les chaines de cellulose sont désordonnées et peuvent établir des liaisons hydrogène avec l'eau ou d'autres molécules.

A - 1.2.2. Hémicelluloses

Les hémicelluloses sont des hétéropolymères ramifiés de sucres à courtes chaînes (degré de polymérisation de 100 à 200). Les hémicelluloses constituent une matrice autour des micro- et macro-fibrilles de cellulose. Il s'agit principalement de pentoses (xylose, arabinose,) et d'hexoses (acide glucuronique, acide galacturonique, mannose, galactose et glucose). Les principaux monosaccharides constitutifs des hémicelluloses sont présentés en Figure 3 [El Hage, 2010]. La composition des hémicelluloses varie fortement en fonction des essences de bois. Les hémicelluloses diffèrent selon les bois (par exemple les hémicelluloses des résineux sont à 10% base de xylose et à 15% à base de glucose et mannose ; chez les feuillus ces proportions passent respectivement à 20 et 5%).

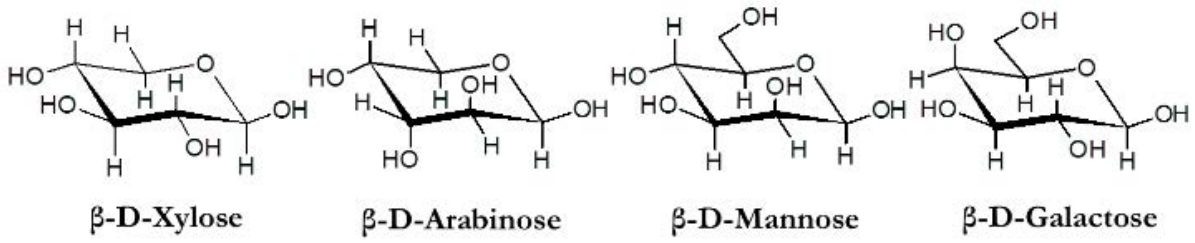


Figure 3: Structure moléculaire des principaux sucres constituant les hémicelluloses [El Hage, 2010]

A - 1.2.3. Lignine

La lignine est un polymère tridimensionnel de nature phénolique. Les monomères de la lignine sont présentés en Figure 4. Ce sont les suivants :

- L'alcool coumarylique, unité H (hydroxyphényle)
- L'alcool conifférylique, unité G (guaïacyle)
- L'alcool sinapylique, unité S (syringyle)

La proportion de chaque monomère varie selon l'essence. Les résineux contiennent presque exclusivement l'unité G, les feuillus G et S, et les graminées les trois unités.

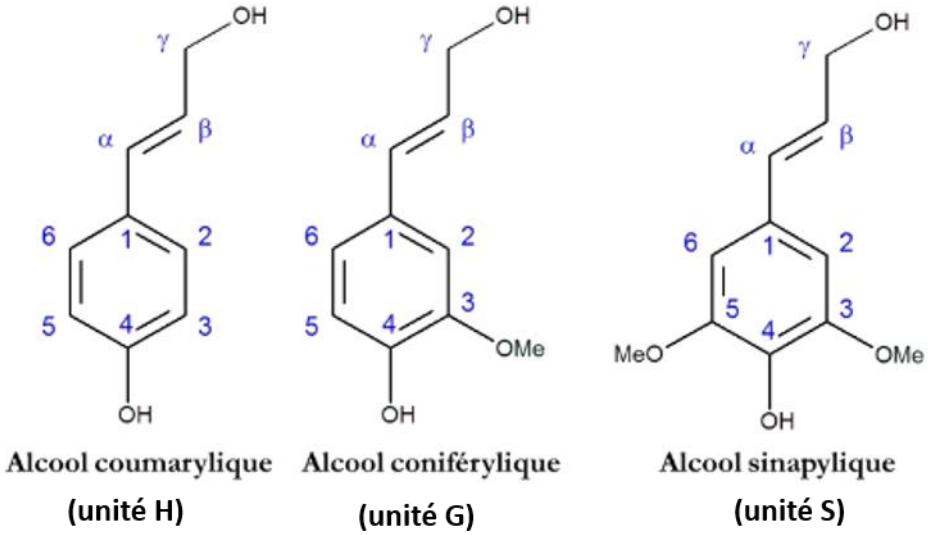


Figure 4: Structure moléculaire des trois unités de la lignine

A - 2. Voies de valorisation de la biomasse

La Figure 5 présente les différentes voies de valorisation envisagées pour la biomasse en fonction de sa composition et de sa teneur en eau. L'objectif final est le même pour toutes les voies : récupérer l'énergie chimique contenue dans la biomasse, soit directement sous forme de chaleur, soit en transformant d'abord la biomasse en vecteur énergétique plus facilement transportable comme du gaz.

Les traitements biologiques sont réservés à la biomasse plutôt humide (taux d'humidité supérieur ou égal à 50% sur masse anhydre). Les différentes fermentations sont caractérisées par 1) la présence ou l'absence d'oxygène et 2) les souches microbiennes utilisées. La fermentation aérobie (compostage) permet une valorisation matière par la production d'un amendement de sol. La fermentation anaérobie permet de produire soit de l'éthanol (fermentation alcoolique), soit du biogaz (un mélange de CH_4 et de CO_2) et un digestat qui peut être valorisé en compost (fermentation méthanique). Le compost est un amendement organique stabilisé, semblable à un terreau. Les traitements biologiques sont les plus recommandés pour la biomasse d'origine animale, comme par exemple le lisier de porc [Levasseur, 2006].

La biomasse végétale peut être traitée par voie chimique ou (plutôt si elle est sèche) thermochimique. Les traitements chimiques peuvent produire des biocarburants à partir de lipides, ou de la fibre de papier, des vernis ou des colles à partir de glucides.

Les traitements thermochimiques s'effectuent entre 200°C et 1500°C. Ils permettent une valorisation énergétique de la biomasse : directe avec la combustion, indirecte avec la pyrolyse, la gazéification ou l'hydro-liquéfaction. La voie thermochimique est la voie principale de valorisation de la biomasse ligno-cellulosique.

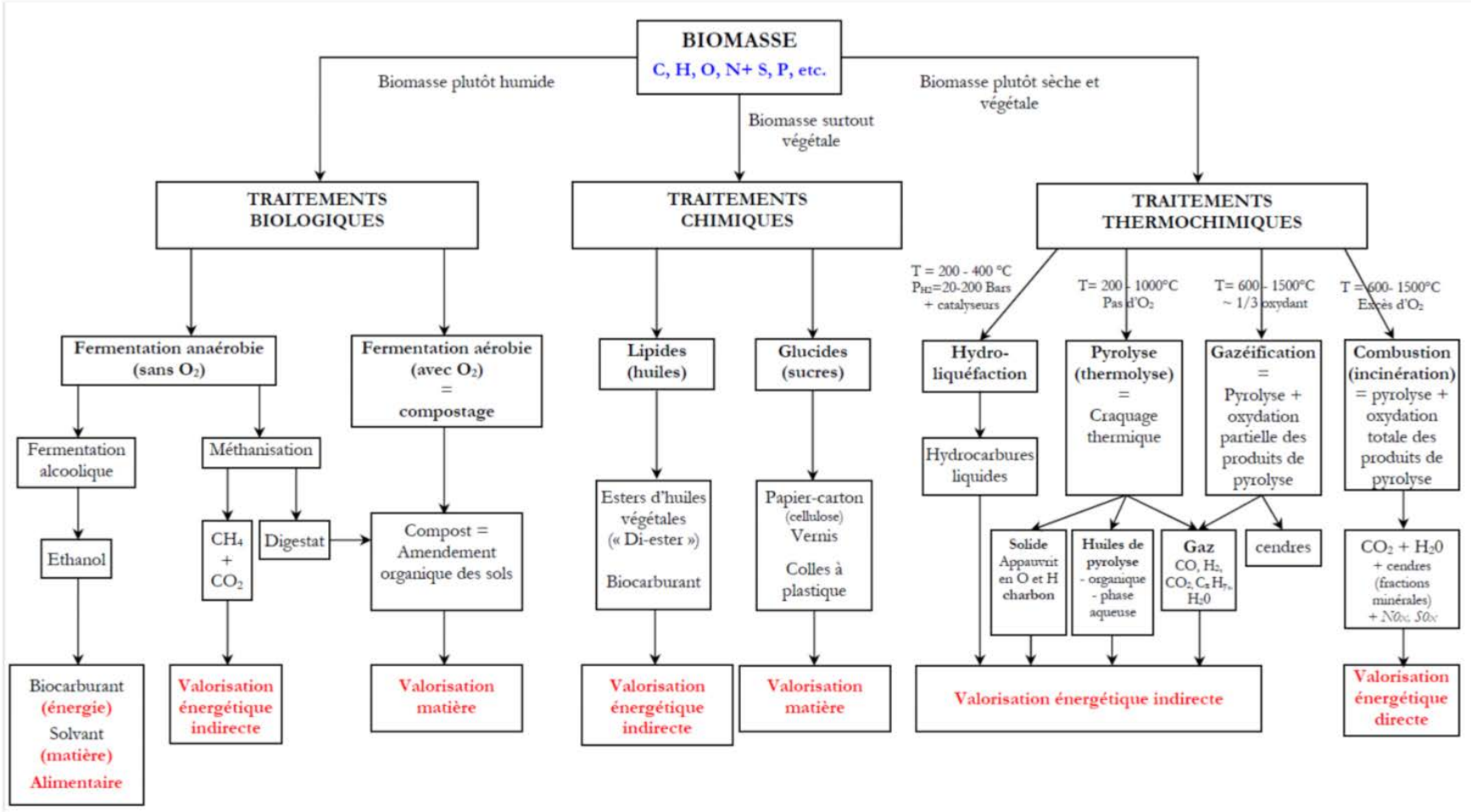


Figure 5: Les différentes voies de valorisation de la biomasse

A - 3. Filières de conversion thermochimique de la biomasse ligno-cellulosique

A - 3.1. Croissance du bois

Lors de leur croissance, les arbres prélèvent du CO_2 dans l'atmosphère et rejettent de l'oxygène. Du sol, ils tirent de l'eau et des éléments nutritifs comme l'azote (N). Une partie de ces éléments est fixée définitivement dans le bois, tandis qu'une autre est restituée au sol via la chute des feuilles ou des aiguilles.

Dans l'arbre, les éléments nutritifs se trouvent surtout dans le cambium, l'épaisseur génératrice des nouvelles cellules ; or en proportion du bois total, la part de cambium est plus importante aux extrémités de l'arbre, dans les petits bois. Ces derniers ont donc une teneur en minéraux plus importante (azote, calcium, magnésium, phosphore).

L'intensification de la sylviculture par récolte de bois de plus petit diamètre entraîne donc une augmentation de l'exportation de minéraux et un appauvrissement du sol [François et al., 2014].

A - 3.2. Récolte, séchage et transformation du bois

L'abattage des arbres se fait traditionnellement à la tronçonneuse à essence. Ils sont ensuite soit

1. Découpés en bûches et laissés à sécher naturellement
2. Broyés sur la parcelle pour produire de la plaquette forestière
3. Transformés en bois de construction ou d'emballage, les résidus de cette transformation étant ensuite envoyés en trituration ou en pelletisation.

Les bûches restent la forme de combustible la plus utilisée par les particuliers ; les bûches de bonne qualité ont jusqu'à deux ans de séchage, et atteignent un taux d'humidité moyen de 25% sur base anhydre.

Les plaquettes forestières sont des morceaux de bois broyés, produits en bord de route ou directement sur la parcelle, soit à partir de rémanents impropres à l'utilisation en scierie, soit, de plus en plus, à partir d'arbres entiers. La teneur en eau des plaquettes est plus élevée que celle des bûches et granulés vendus aux particuliers (jusqu'à 40% d'humidité sur base anhydre). Elles sont adaptées aux chaudières de moyenne à grande puissance (500kW à 4MW, ou plus), notamment pour les réseaux de chaleur.

Les granulés de bois, ou « pellets », se présentent sous la forme de petits bâtonnets cylindriques de sciure compactée. Originellement fabriqués à partir de résidus de scierie, leur consommation a fortement augmenté ces dernières années, et des arbres entiers peuvent maintenant être transformés en granulés ; la production française a plus que triplé entre 2008 et 2012 [Gipeblor et al., 2014]. Leur fabrication est la transformation la plus intensive, et impose de sécher la biomasse jusqu'à atteindre une humidité inférieure ou égale à 10% (sur bois sec). Cette faible humidité garantit un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) supérieur ou égal à 4.7 kWh par kg. Le PCI est l'énergie dégagée par la réaction de combustion dans les conditions normales de température et de pression (hors chaleur latente de l'eau). Il diminue avec l'humidité du combustible.

Le bois est transporté sur une distance variable selon sa forme. Le bois bûche reste majoritairement une ressource locale ; les granulés et plaquettes forestières peuvent être transportés sur de plus grandes distances. Le Tableau 3 présente les consommations de carburant et d'énergie relevées dans la littérature pour la récolte, la transformation et le transport du bois.

Tableau 3: Données de consommation issues de la littérature pour les étapes de récolte, de transformation et de transport des arbres

Etape de production	Forme d'énergie consommée	Donnée	Source
Récolte	Essence (tronçonneuse)	20,0 L / tonne bois vert	[Laitila et al., 2010]
Broyage en plaquettes	Diesel (broyeuse)	7,4 L / tonne bois vert	[Laitila et al., 2010]
Découpage des bûches	Diesel	0,677 L / m^3	[Smidt & Gallagher, 2013]
Pelletisation	Electricité	45,72 MJ / GJ granulés	[Siyu Chen, 2009]
	Chaleur (gaz naturel ou électricité)	262,5 MJ / GJ granulés	
Transport du bois (distances inférieures ou égales à 50km)	Diesel (capacité du camion 1800 kg)	0,13 L / (tonne bois vert·km)	[ADEME, 2012a, p. 2]
Transport du bois (distances supérieures à 50km)	Diesel (capacité du camion 2500 kg)	0,11 L / (tonne bois vert·km)	

A - 3.3. Conversion énergétique de la biomasse

La présence de lignine dans la biomasse rend plus difficile la valorisation par fermentation ou traitement chimique, et demande des étapes supplémentaires de prétraitement qui diminuent les rendements énergétiques et économiques. C'est pourquoi les voies les plus répandues de valorisation de la biomasse ligno-cellulosique sont les voies thermochimiques. La Figure 6 reprend les principaux procédés thermochimiques de valorisation de la biomasse ligno-cellulosique, présentés en Figure 5. Selon le procédé, la biomasse peut être valorisée sous forme de chaleur, d'électricité, de carburants gaz ou liquides.

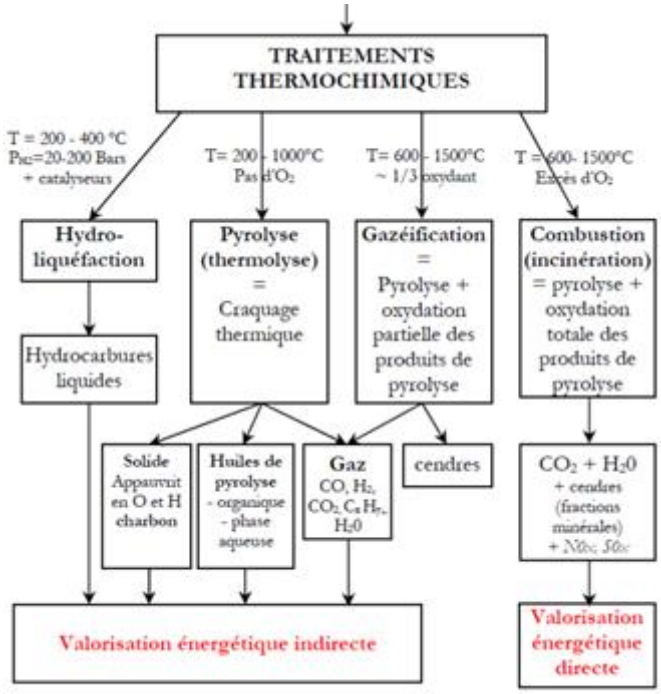


Figure 6: Les voies thermochimiques de valorisation de la biomasse

La combustion (oxydation totale du combustible) est la voie de valorisation la plus répandue, mais d'autres méthodes de conversion thermochimique se développent :

- La gazéification consiste en une oxydation ménagée de la biomasse pour produire un gaz de synthèse. Ce gaz, appelé syngaz, peut être ensuite valorisé pour produire de l'électricité, de la chaleur ou des carburants liquides ou gazeux (H_2 ou CH_4).
- La pyrolyse consiste en une conversion thermochimique de la biomasse, sans apport d'oxygène. Elle permet de produire du syngaz, du charbon et des bio-huiles (sucres, acides, aromatiques). Ces bio-huiles peuvent être ensuite converties en carburants ou en composés chimiques.

- La liquéfaction consiste en une conversion de la biomasse sous l'effet de la chaleur et en présence d'un solvant (eau, éthanol, etc.), parfois d'un catalyseur et d'hydrogène. Elle produit principalement une bio-huile qui présente une plus faible teneur en oxygène que la bio-huile de pyrolyse.

Cette thèse est focalisée sur la valorisation par combustion.

A - 3.4. Valorisation par combustion

L'utilisation énergétique la plus ancienne et la plus répandue est la combustion dans le but de produire de la chaleur pour l'habitat, la cuisson, l'industrie etc. La combustion consiste en une oxydation plus ou moins rapide et à haute température de produits combustibles.

Pour les solides comme le bois, la combustion se déroule en trois étapes, présentées en Figure 7 [Nussbaumer, 2003]:

- Séchage du combustible (*drying*) ;
- Dégradation thermique, souvent appelé pyrolyse (*devolatilization*) ;
- Combustion des gaz, puis oxydation lente du résidu charbonneux (*oxidation*).

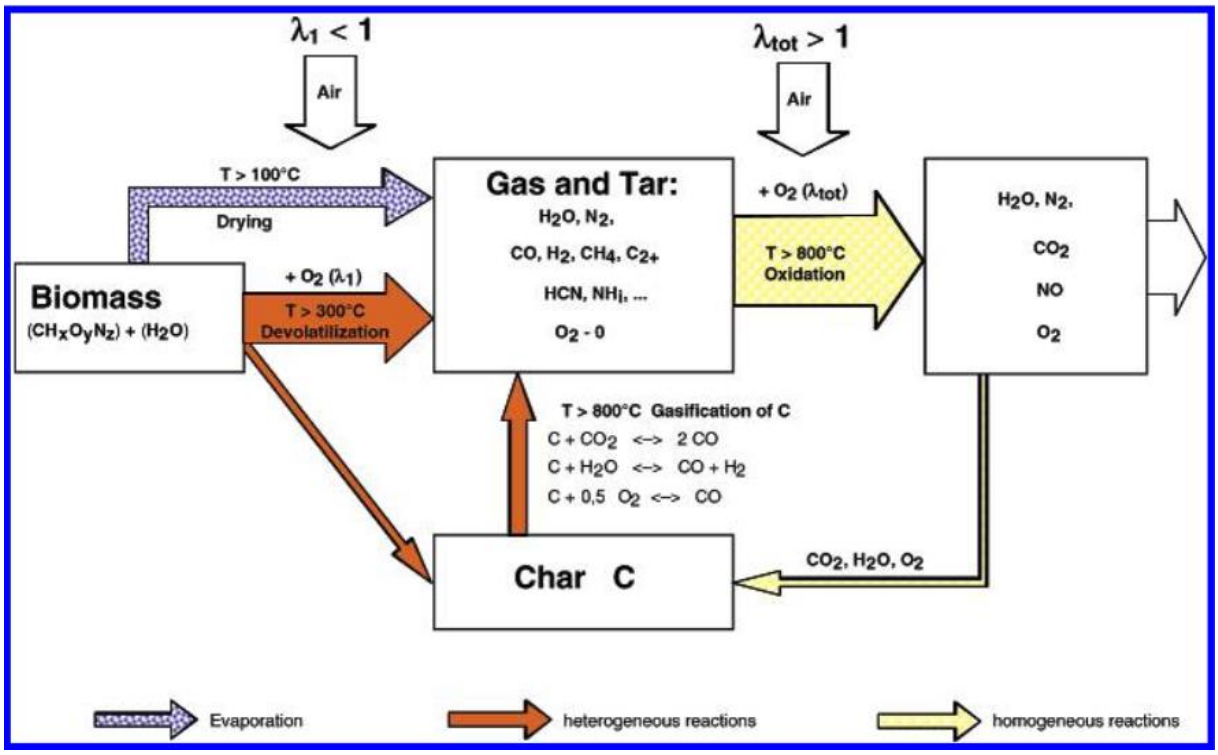


Figure 7: Réactions principales durant la combustion de la biomasse avec apport d'air primaire et secondaire [Nussbaumer, 2003]

Durant la pyrolyse (en Figure 7, « Devolatilization ») se forment des gaz, des goudrons primaires (« tar ») et des charbons (« char »). Les goudrons continuent de réagir dans la flamme, à haute température. Cette phase est qualifiée de phase de réaction homogène, car elle se déroule entièrement en phase gaz (flèche jaune sur la Figure 7). C'est lors de cette phase que se forment les polluants, et notamment les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP).

Chacune des trois phases a lieu simultanément au sein d'un foyer de combustion. L'étagement et le contrôle de ces trois étapes dans la technologie de combustion va conditionner l'émission de polluants. L'étagement consiste à séparer l'apport d'air primaire, qui permet une première combustion, et l'apport d'air secondaire qui vise à favoriser les réactions en phase homogène d'oxydation des goudrons et polluants. Par exemple la Figure 8 présente deux système de combustion différents ; la chambre de postcombustion du second système permet de mieux contrôler les réactions en phase homogène (et l'apport d'air secondaire) et ainsi de réduire les émissions de polluants.

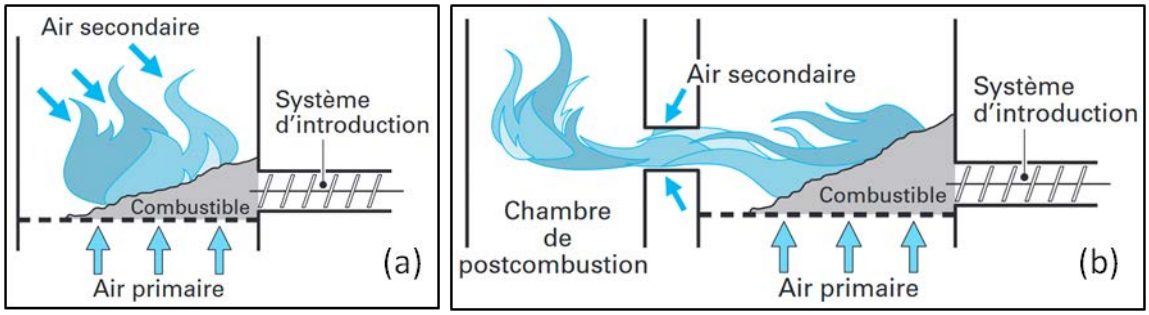


Figure 8: Schéma de principe a) d'un foyer à grille fixe et b) d'un système avec avant foyer [Rogaume, 2005a]

Les technologies de combustion varient en fonction de l'échelle de l'installation et de l'utilisation finale de la chaleur. Toutes ne peuvent pas être alimentées par les mêmes combustibles, principalement en raison des dimensions et de l'humidité de ces derniers.

Le Tableau 4 présente un échantillon des principales technologies de combustion : leur gamme de puissance et les combustibles utilisés, ainsi que la teneur en cendres et l'humidité typiques de ces combustibles [Nussbaumer, 2003]. Les technologies les plus communes sont ensuite détaillées.

Tableau 4: Récapitulatif de différentes technologies de combustion du bois, à partir de [Nussbaumer, 2003]

Catégorie d'équipement	Type	Fourchette de puissance	Carburants	Taux de cendres	Humidité
A chargement manuel	Poêles à bûches	2 -10 kW	Bûches sèches	<2%	5% – 20%
	Chaudières à bûches	5 – 50 kW	Bûches, résidus de bois	<2%	5% - 30%
A granulés	Poêles et chaudières à granulés	2 – 25 kW	Granulés de bois	<2%	8% - 10%
Automatiques	Fours à alimentation inférieure	20 kW – 2,5 MW	Plaquettes de bois, résidus de bois	<2%	5% - 50%
	Fours à grille mobile	150 kW – 15 MW	Tous combustibles bois et la plupart des biomasses	<50%	5% - 60%
	Pré-four à grille	20 kW – 1,5 MW	Bois sec (résidus)	<5%	5% - 35%
	Four à alimentation inférieure avec grille rotative	2 – 5 MW	Plaquettes de bois à haute humidité	<50%	40% - 65%
	Brûleur à cigares	3 – 5 MW	Meules de paille	<5%	20%
	Fours à meules entières	3 – 5 MW	Meules de paille entières	<5%	20%
	Fours à paille	100 kW – 5 MW	Meules de paille avec déchiqueteur de meules	<5%	20%
	Lit fluidisé stationnaire	5 – 15 MW	Biomasses variées, d<10mm	<50%	5% - 60%
	Lit fluidisé circulant	15 – 100 MW	Biomasses variées, d<10mm	<50%	5% - 60%
	Brûleur à poussière, flux entraîné	5 – 10 MW	Biomasses variées, d<5mm	<5%	<20%
A co-combustion (part de la biomasse généralement inférieure à 10% de la masse totale consommée)	Lit fluidisé stationnaire	20 – 150 MW total	Biomasses variées, d<10mm	<50%	5% - 60%
	Lit fluidisé circulant	100 – 300 MW total	Biomasses variées, d<10mm	<50%	5% - 60%
	Brûleur à cigares	5 – 20 MW paille	Meules de paille	<5%	20%
	Brûleur à poussière dans les chaudières à charbon	100 MW – 1GW total	Biomasses variées, d<2-5 mm	<5%	<20%

A - 3.4.1. Technologies de combustion à petite échelle

A - 3.4.1.1. Cheminées et foyers fermés

Les cheminées sont des foyers de combustion ouverts, à très faible rendement (de l'ordre de 10%). Elles ne peuvent servir que d'appoint et non de mode de chauffage principal. Elles peuvent être équipées d'un récupérateur de chaleur pour améliorer légèrement le rendement.

Une cheminée existante peut être améliorée par l'installation d'un insert, qui la transforme en foyer fermé. La combustion dans ce type d'installation est mieux contrôlée que dans une cheminée classique grâce à un apport d'air mieux maîtrisé. De plus, les inserts et foyers fermés permettent une récupération de chaleur plus importante par l'intermédiaire d'un échangeur dans lequel circule un flux d'air qu'il est également possible de contrôler [Rogaume, 2005a].

A - 3.4.1.2. Poêles

Les poêles sont des appareils indépendants souvent utilisés en appoint pour chauffer une pièce ou durant les mi-saisons pour maintenir des températures suffisantes, notamment en soirée. Ils permettent de chauffer principalement une pièce par convection naturelle, ou plusieurs pièces via une distribution d'air chaud par des gaines. Les puissances varient de 5 à plus de 15 kW selon les appareils. Il existe maintenant des systèmes automatiques à granulés qui simplifient l'utilisation et permettent toujours un chauffage au bois. Le rendement de combustion dans les poêles est très fluctuant selon la technologie utilisée et varie de 30 à 80 % sur PCI [Rogaume, 2005a].

A - 3.4.1.3. Cuisinières

D'un rendement relativement faible (30% à 70%), les cuisinières demeurent très utilisées dans les endroits reculés car elles permettent, avec le même appareil, d'assurer le chauffage de l'habitation et de proposer un dispositif de cuisson complet avec four [Rogaume, 2005a].

A - 3.4.1.4. Chaudières de faible à moyenne puissance (<25 kW)

Les chaudières diffèrent des autres installations par le fait qu'elles sont reliées à un réseau de chauffage central. Leur but est alors de chauffer un volume de fluide caloporteur (généralement de l'eau) qui va ensuite circuler dans le réseau de chauffage (conduites et radiateurs). De nombreux types de chaudières existent. Les différences résident principalement dans la technologie de combustion et la circulation des gaz. Dans les chaudières automatiques à granulés de bois, l'alimentation se fait par l'intermédiaire d'une vis sans fin (ou d'un tapis), à partir d'un silo jusqu'au foyer de combustion, de manière similaire aux installations utilisant des combustibles fossiles [Rogaume, 2005a].

A - 3.4.2. Technologies de combustion à l'échelle industrielle

A - 3.4.2.1. Chaudières de forte puissance (jusqu'à 100 MW)

Les chaudières industrielles ou collectives peuvent utiliser une biomasse beaucoup plus humide que les équipements à petite échelle. Elles peuvent être alimentées par exemple en plaquettes forestières, dont le taux d'humidité typique est de 40%. Les différents types de chaudières se distinguent principalement par leur foyer de combustion : foyer à grille fixe, foyer à grille mobile, lit fluidisé stationnaire, lit fluidisé circulant, etc. [Nussbaumer, 2003].

A - 3.4.2.2. Réseaux de chaleur

La plupart des chaufferies à bois sont conçues pour alimenter un **réseau de chaleur**. Le réseau permet de mutualiser la production d'énergie et ainsi de partager les investissements entre plusieurs consommateurs et pour différentes utilisations : chauffage particulier, chauffage collectif, chauffage urbain, énergie industrielle. Les réseaux de chaleur au bois se sont largement développés en France depuis 2006, notamment grâce aux aides du Fonds Chaleur de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'énergie [AMORCE/ADEME, 2013].

Un **réseau de chaleu**r se compose d'un générateur de chaleur (ici une chaudière à bois de forte puissance) et de plusieurs circuits de distribution. La Figure 9 en présente le principe général. En règle générale, un circuit primaire (Figure 9, 1ère boucle) permet si nécessaire de coupler plusieurs générateurs ; puis un système d'échangeurs (sous-station) distribue l'énergie vers un circuit secondaire (Figure 9, 2ème boucle). Des échangeurs situés sur le circuit secondaire distribuent l'énergie souhaitée au client final, qui paie en fonction de sa propre consommation. Les échangeurs thermiques utilisés sont la plupart du temps des échangeurs à plaques, à très bon rendement (>95%). Il y a néanmoins des pertes thermiques le long du réseau de voirie, qui sont prises en compte au moment du dimensionnement [Rogaume, 2005b].

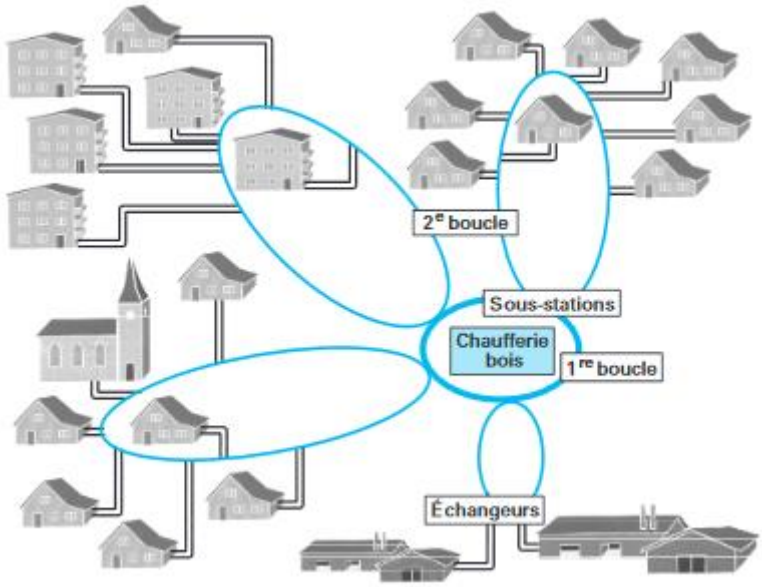


Figure 9: Schéma de principe d'un réseau de chaleur [Rogaume, 2005b]

Dans les réseaux de chaleur à bois, la chaudière à bois est toujours couplée à un autre générateur de chaleur au gaz naturel ou au fioul. Ceci permet d'assurer un fonctionnement optimal de l'installation en toutes conditions. Par exemple, pour répondre à des besoins de chaleur de 1 MW en heure de pointe, la chaudière à bois aura une puissance comprise entre 500 et 700 kW et sera couplée avec une installation utilisant un combustible fossile de 1 MW [Rogaume, 2005b]. Ainsi la chaudière au bois fonctionnera presque continuellement à plein régime, avec des rendements de combustion élevés et des émissions polluantes faibles. Le générateur à combustible fossile ne sera utilisé que pour satisfaire des pics de demande supérieurs à la capacité de la chaudière à bois, ou pour répondre aux besoins en cas d'arrêt de la chaudière bois (maintenance, panne). L'énergie est alors produite à plus de 90% par la chaudière bois [Rogaume, 2005b].

A - 3.4.2.3. Cogénération

Les deux formes principales de valorisation de l'énergie d'un combustible sont la chaleur et l'électricité. L'utilisation directe sous forme de chaleur peut atteindre des rendements supérieurs à 90%. En revanche, les rendements de conversion électrique sont beaucoup plus faibles : entre 15% et 50% pour les installations les plus modernes. La cogénération vise à combiner les deux types d'utilisation ; le rendement global de l'installation peut alors atteindre 90%. La cogénération à partir d'un combustible solide comme le bois peut être réalisée soit par gazéification, puis combustion du gaz dans une unité secondaire, soit par combustion directe suivie d'une valorisation mécanique et thermique de l'énergie produite.

Dans le cas d'une combustion directe, une chaudière à biomasse chauffe un fluide caloporteur (eau, huile ou air) qui est ensuite dirigé vers un système convertissant l'énergie thermique en énergie mécanique puis en électricité. Dans la majorité des cas, le fluide utilisé est de l'eau, surchauffée à l'état de vapeur haute pression, dirigée vers un moteur à vapeur ou une turbine à vapeur [Rogaume, 2005b].

A - 3.4.2.4. Co-combustion

Dans certains processus industriels, le bois est utilisé en mélange avec d'autres combustibles. On parle alors de co-combustion (« co-firing »). Cette technique a plusieurs avantages et inconvénients (Tableau 5, [Rogaume, 2005b]). De manière générale, la biomasse et plus particulièrement le bois est utilisé en co-combustion comme régulateur, pour réduire les émissions polluantes et améliorer le contrôle de combustion. Les combustibles les plus utilisés en mélange avec de la biomasse sont le charbon et certaines boues, mais également des déchets, surtout lorsque leur taux d'humidité est élevé.

Tableau 5: Avantages et inconvénients de la co-combustion du bois [Rogaume, 2005b]

Avantages	Inconvénients
Diminution de la température de combustion en raison du faible contenu énergétique du bois comparé aux combustibles fossiles, d'où limitation de certaines émissions polluantes (ex. oxydes d'azote).	Les différences de densité et de granulométrie entre les combustibles peuvent causer des difficultés d'introduction.
Modification des processus de combustion à cause du fort taux de matières volatiles dans la biomasse, notamment par rapport à des combustibles riches en carbone fixe comme le charbon. Le changement de type de combustion permet dans ce cas de mieux maîtriser le processus.	Les différences de masse volumique peuvent donner lieu à des envols de particules au sein de la chambre de combustion.
Piégeage possible de liquides tels que des boues. Le bois peut alors servir de vecteur et de support pour leur destruction thermique.	Certaines biomasses contiennent des matières minérales à faibles températures de fusion (potassium, par exemple), qui peuvent générer des problèmes de corrosion ou de dépôts sur les parois des fours.

A - 3.4.3. Capture et stockage de carbone

La technologie de capture et de stockage du carbone (CSC) est l'un des axes technologiques considérés dans les scénarios d'atténuation du changement climatique [IPCC, 2005]. Le principe est de capturer le CO_2 à la sortie des installations industrielles et de l'injecter dans un réservoir souterrain comme par exemple une mine ou un aquifère. Combiné avec la biomasse qui capture du CO_2 en poussant, cette technologie pourrait donner lieu à des émissions négatives, mais elle est encore au stade de démonstration.

A - 3.4.4. Emissions polluantes liées à la combustion du bois

Les produits principaux de la combustion du bois sont le dioxyde de carbone (CO_2) et l'eau. La combustion émet aussi des polluants tels que le monoxyde de carbone (CO), le méthane (CH_4), d'autres composés organiques volatils, des oxydes d'azote, des particules etc.

Ces émissions sont étudiées depuis longtemps car d'une part, elles témoignent d'une mauvaise combustion, et donc d'une diminution du rendement énergétique, et d'autre part elles peuvent être nocives pour l'environnement ou pour la santé humaine. Dès 1979, une étude de l'Agence américaine de protection de l'environnement a identifié plus de 40 composés cancérigènes dans les fumées de cheminées et de poêles à bois ([DeAngelis et al., 1979], dans [Cooper, 1980]). Plus récemment, les particules et en particulier les particules fines, ont été classées comme « cancérigènes certains » par le Centre International de Recherche sur le Cancer [IARC, 2013].

Les émissions de polluants varient énormément selon le combustible, la technologie de combustion et les conditions opératoires. Par exemple, Kshirsagar et Kalamkar (2014) ont passé en revue 31 modèles de cuisinières à bois, pour des résultats d'émissions extrêmement variés : pour faire bouillir un litre d'eau, les cuisinières de l'échantillon émettent entre 0.5 et 19 g de CO, et entre 0.9 et 850 g de particules [Kshirsagar & Kalamkar, 2014].

Cette variabilité se retrouve dans tous les types d'appareils à combustion de bois. La Figure 10 présente les émissions de CO de différents appareils, d'après la revue bibliographique de Collet (2009) [Collet, 2009]. La variabilité des facteurs d'émission est extrêmement importante ; on remarque cependant que les appareils récents (appareils à granulés, chaudières modernes) ont une plage d'émissions moins étendue.

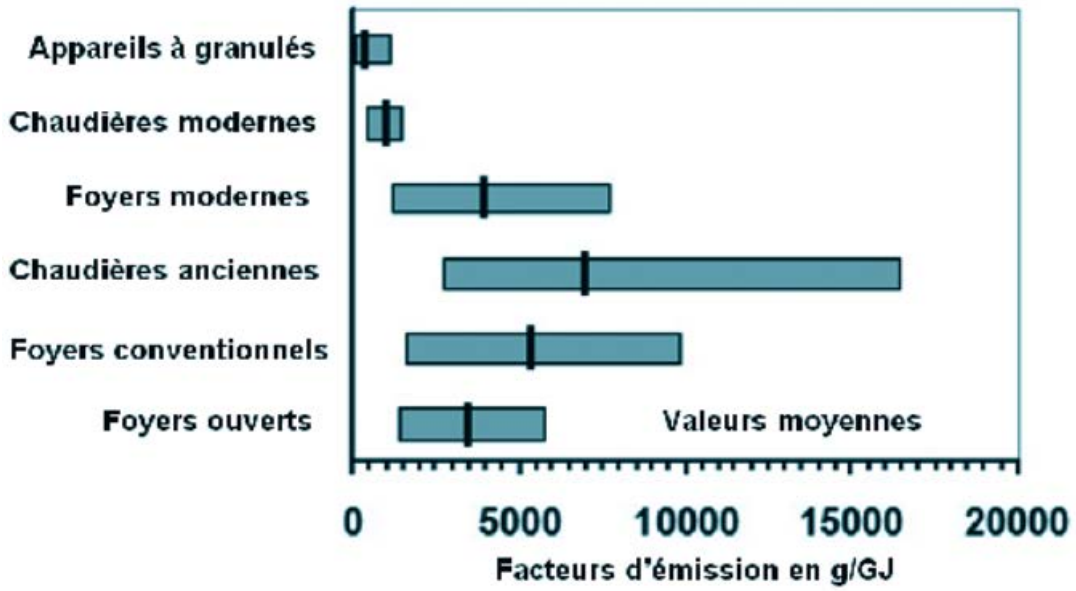


Figure 10: Emissions de CO de différents appareils, rapportés en unité d'énergie entrante [Collet, 2009]

En effet, les progrès technologiques tendent à diminuer les émissions de polluants des installations, en conditions d'utilisation normale. Ainsi, lorsque Solli et son équipe (2009) ont comparé les émissions d'un poêle à bois récent avec un modèle plus ancien, ils ont constaté une baisse d'un facteur dix des émissions de CO et de particules, et une baisse d'un facteur cent des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) [Solli et al., 2009].

Mais plus encore que l'ancienneté des équipements, ce sont les conditions opératoires (apport d'air, humidité du combustible etc.) qui influencent les émissions polluantes, particulièrement pour les équipements à alimentation manuelle, comme les poêles et chaudières à bûches.

Une étude de Laurence Robert (2006) a analysé les émissions polluantes de deux appareils de type foyer fermé / insert, et examiné l'effet du régime de combustion (allure nominale ou réduite) et de l'humidité du combustible. Le premier appareil est un foyer fermé classique de technologie non récente (environ 15 ans). Cet appareil est muni de deux admissions d'air, un air primaire dit « air de grille » et un air secondaire admis au-dessus de la vitre. Le rendement moyen est de 55%, et la production de cendres résiduelles peut dépasser les 5% de la masse de bois brûlée. Le second est un foyer fermé encastrable « insert » répondant à la charte Flamme Verte 2004, dans laquelle il est stipulé que tout appareil doit assurer un rejet de CO inférieur à 1 % et avoir un rendement de 60 % minimum en allure nominale. Le rendement moyen obtenu est supérieur à 67%, et le taux de cendres avoisine 2% de la masse brûlée. Le Tableau 6 présente le résultat des analyses d'émissions polluantes pour ces deux appareils à allure nominale et réduite, pour différentes classes de bois d'humidité relative (HR) variable [Robert, 2006].

Tableau 6: Emissions polluantes de deux appareils de type insert/foyer fermé [Robert, 2006]

Emissions polluantes (g/kg de bois)			Bois très sec HR < 12%	Bois sec 15 < HR < 20%	Bois humide HR > 20%
Poussières	Foyer fermé	Allure nominale	---	1,6	---
		Allure réduite	8,2	11,2	14,3
	Insert labellisé	Allure nominale	0,2	0,6	2,6
		Allure réduite	---	1,7	---
Monoxyde de carbone	Foyer fermé	Allure nominale	---	66	70
		Allure réduite	47	106	156
	Insert labellisé	Allure nominale	42	82	---
		Allure réduite	---	207	---
Hydrocarbures imbrûlés	Foyer fermé	Allure nominale	---	---	2,7
		Allure réduite	1,2	2	4,6
	Insert labellisé	Allure nominale	0,7	2	6,3
		Allure réduite	---	12,2	---

L'insert labellisé produit moins de poussières par kg de bois brûlé que le foyer fermé ancien, mais ses émissions de CO et de HAP sont supérieures. Ceci résulte des deux arrivées d'air du foyer ancien, qui permettent une meilleure combustion et une baisse des concentrations de polluants par rapport à l'unique admission d'air de l'insert. Le fonctionnement à allure réduite émet deux à trois fois plus de polluants, voire six à sept fois pour la poussière du foyer fermé et les HAP de l'insert labellisé. Les émissions polluantes augmentent également fortement avec l'humidité du combustible.

Une autre étude par Ozgen *et al.* (2014) a démontré que les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) étaient doublées en conditions réelles par rapport aux valeurs de références proposées dans le guide d'inventaire des émissions polluantes de l'Agence Européenne pour l'environnement [EEA, 2016; Ozgen et al., 2014]. La maitrise de l'équipement par l'utilisateur a donc une importance non négligeable.

La combustion de la biomasse et l'ensemble de la chaîne de valorisation sont loin d'être neutres sur le plan environnemental. Pour pouvoir comparer les impacts du bois-énergie et des énergies fossiles, ou les impacts de différentes chaînes de valorisation du bois, il est nécessaire d'effectuer une Analyse de Cycle de vie.

A - 4. Analyse de Cycle de Vie

A - 4.1. Méthodologie ACV

A - 4.1.1. Méthodologie générale

La notion de durabilité est issue des réflexions du Club de Rome au début des années 1970. Dans le rapport « Halte à la croissance : les limites de la croissance » publié en 1972, des scénarios mondiaux, réalisés à partir d'un modèle qui prend en compte à la fois les aspects économiques, démographiques et environnementaux, indiquent que la croissance de la production industrielle entraînera à terme un effondrement du revenu par habitant, de la ration alimentaire et, en conséquence, de la population mondiale. Cette production utilise en effet de plus en plus de matières premières et de ressources naturelles, et elle s'accompagne d'une pollution croissante [Meadows et al., 1992]. Depuis 1972, le progrès technologique et les avancées de la science de l'environnement ont amené à réviser certaines des hypothèses du rapport Meadows, mais l'existence de limites naturelles à la croissance a été confirmée par l'évaluation des risques liés au changement climatique.

Le terme de « développement durable » est proposé en 1980 dans la Stratégie Mondiale de la Conservation publiée par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN, crée en 1948), le Fonds Mondial pour la Nature (World Wildlife Fund, WWF, créé en 1961) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE, créé en 1972) [UICN et al., 1980]. Ce nouveau terme cherche à traduire l'objectif de concilier le développement des sociétés humaines et la conservation de la nature. Le développement durable atteint une renommée internationale avec la création en 1983 de la commission mondiale de l'ONU pour l'environnement et le développement (commission Brundtland). Le développement durable est défini comme devant « répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » [Brundtland, 1987].

L'Analyse de Cycle de Vie, ou ACV, est issue de cette exigence de développement durable. Elle fournit une méthode qui permet de quantifier les impacts potentiels sur l'environnement d'un produit, d'un service ou d'un procédé. Les premiers outils normatifs encadrant les études d'impact apparaissent en 1997 avec la norme ISO 14040, révisée en 2006. L'ACV est maintenant couramment utilisée pour comparer les impacts sur l'environnement de différentes solutions technologiques ou scénarios de production d'un bien ou service. Elle est encadrée par les normes ISO 14040 (Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre) et ISO 14044 (Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices) [ISO, 2006a, 2006b]. La norme ISO 14044 remplace et annule trois autres normes désormais obsolètes : ISO 14041

(Définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse), ISO 14042 (Évaluation de l'impact du cycle de vie) et ISO 14043 (Interprétation du cycle de vie).

L'Analyse de Cycle de Vie comporte plusieurs étapes, présentées en Figure 11 [ADEME, 2005]:

1) Définition des limites du système et de l'unité fonctionnelle
2) Inventaire de Cycle de Vie (ICV) : il s'agit de faire le bilan matière et énergie du système afin de répertorier l'ensemble des flux entrants et sortants, rapportés à l'unité fonctionnelle.
3) Evaluation des Impacts : les résultats de l'ICV sont transformés en impacts potentiels par l'application de facteurs de caractérisation d'impact. A chaque élément de l'inventaire et chaque impact correspond un facteur de caractérisation. Ces facteurs peuvent avoir une incertitude importante.
4) Interprétation des résultats.

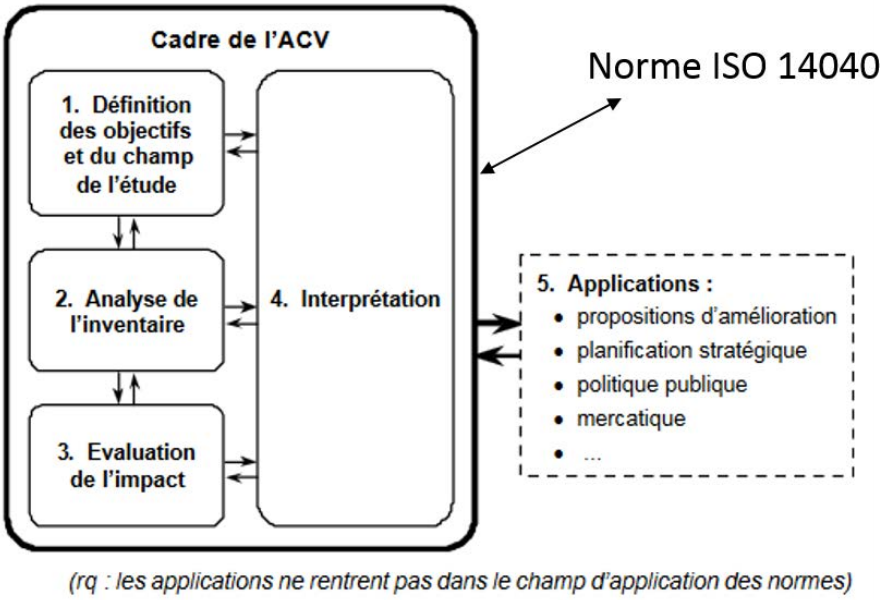


Figure 11: Les étapes de l'Analyse de Cycle de vie [ADEME, 2005]

A - 4.1.1.1. Définition des limites du système et de l'unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle quantifie la fonction remplie par le système étudié. Pour comparer deux systèmes, il est nécessaire d'avoir la même unité fonctionnelle.

Les limites du système comprennent : les frontières physiques (bornes amont et aval de la chaîne de production), les frontières géographiques (par exemple quel est le mix énergétique du pays concerné, c'est-à-dire les proportions des différentes sources d'énergie dans la consommation finale, quels sont les réseaux de transport, etc.), l'horizon temporel, et le cas échéant la méthode d'allocation des impacts (par extension des frontières, par affectation au prorata massique, énergétique, économique, etc.).

A - 4.1.1.2. L'Inventaire de Cycle de Vie (ICV)

L'étape d'ICV est l'évaluation qualitative et quantitative de l'ensemble des flux élémentaires du système étudié en référence à l'unité fonctionnelle. Dans un premier temps, on construit un diagramme des processus du cycle de vie du système selon les limites définies précédemment. Ensuite, on collecte les données relatives aux différentes activités incluses dans le système afin de prédire l'ensemble des consommations et des émissions. Pour cette étape d'inventaire, il existe des bases de données qui contiennent des inventaires de cycle de vie complet pour de nombreux processus, la plus importante étant la base de données EcoInvent [EcoInvent, n.d.]. Ces bases de données permettent notamment d'obtenir les ICV de processus amont comme par exemple la production et la distribution d'électricité selon le mix énergétique français.

A - 4.1.1.3. L'évaluation des impacts

Cette étape consiste à traduire les données de l'ICV en impacts sur l'environnement. Chaque ressource consommée, chaque émission polluante, affecte différentes catégories d'impacts à un degré variable. Les impacts calculés et les facteurs de conversion varient d'une méthode de caractérisation ACV à une autre. Nous discuterons ce point plus en détail au paragraphe A - 4.1.5.

A - 4.1.1.4. L'interprétation des résultats

Il s'agit de faire ressortir les résultats les plus parlants et d'en tirer des conclusions. La fiabilité de ces dernières doit être testée par des analyses de sensibilité et d'incertitude sur les résultats ACV ou sur l'ICV. Une analyse de sensibilité vise à quantifier l'influence des variables d'entrée d'un modèle sur les variables de sortie. Elle s'effectue en faisant varier la valeur d'une seule variable d'entrée à la fois, tous les autres paramètres restant à leur valeur nominale. L'analyse d'incertitude cherche à déterminer l'incertitude dans les résultats issue de l'incertitude dans les variables d'entrée.

A - 4.1.2. ACV Attributionnelle et ACV conséquentielle

Il existe deux types principaux d'ACV, l'ACV *attributionnelle* et l'ACV *conséquentielle*.

L'ACV attributionnelle considère que le système étudié est établi et n'entraîne pas de modifications majeures des chaînes de production des différents fournisseurs de processus élémentaires. Le système est considéré comme isolé du reste du monde.

L'ACV conséquentielle est une approche plus récente et complémentaire de l'approche attributionnelle. Comme l'ACV attributionnelle, elle évalue les impacts d'un système en se basant sur les flux physiques du cycle de vie du système étudié. Mais elle prend également en compte les conséquences de la mise en place ou du changement de cycle de vie du système étudié sur les moyens de production environnants. La Figure 12 illustre cette idée sur un procédé théorique [Ekvall & Weidema, 2004].

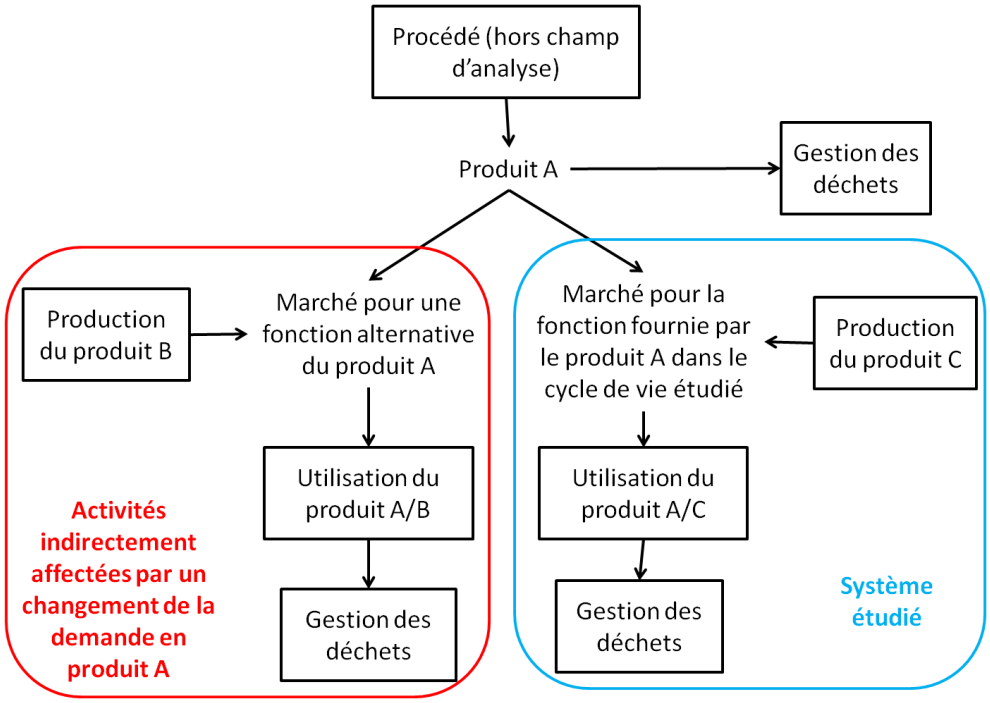


Figure 12: Illustration d'un procédé théorique et des activités qui peuvent être indirectement affectées par un changement de la demande en produit A dans le système étudié (à partir de [Ekvall & Weidema, 2004])

Dans la Figure 12, si le système bleu est mis en place, il mobilisera une partie des ressources actuellement utilisées par le système rouge (produit A). Ceci entraînera soit un changement du système rouge et donc de ses impacts environnementaux, par exemple en trouvant une alternative au produit A ; soit une augmentation de la production de A et donc des impacts liés à cette production. Par exemple, l'introduction massive de voitures électriques dans un parc de véhicules entraînerait une augmentation de la consommation d'électricité et peut-être la mise en place de nouvelles centrales de production, donc une évolution du mix électrique. Les frontières du système étudié sont donc élargies pour permettre d'évaluer l'impact d'une décision.

La terminologie « ACV conséquentielle » a été adoptée en 2001 lors d'un atelier sur les données d'électricité dans l'ICV [Curran et al., 2002]. Mais la distinction entre les deux approches avait déjà été explorée par de nombreux chercheurs [Baumann, 1996, 1998; Cowell, 1998; Ekvall, 1999; Heijungs, 1997; Heintz & Baisnée, 1992; Hofstetter, 1998; Tillman, 2000; Weidema, 1993]. Cette approche est particulièrement intéressante pour l'évaluation de nouvelles technologies et des choix stratégiques liés à ces technologies. Cependant, elle nécessite la capacité à prédire l'ensemble des changements d'ordre économique qu'engendrerait la mise en place du projet étudié. Un exemple particulièrement intéressant est celui du changement d'usage des sols, notamment dans l'étude des agro-carburants. Nous développons ce point dans le paragraphe suivant (A - 4.1.3).

Dans cette thèse, nous nous intéressons à des plantations sylvicoles établies ; l'objectif est de comparer entre eux différents scénarios de chauffage à bois et d'exploitation des plantations. C'est pourquoi nous avons choisi de mener une ACV attributionnelle.

Une analyse conséquentielle des scénarios demanderait un travail supplémentaire sur le marché des énergies et les effets de compensation ; par exemple, comment évoluerait le mix électrique en cas de baisse de la demande en chauffage électrique. Ou encore, si la demande en bois augmente fortement, la zone d'approvisionnement devrait s'élargir et la consommation de carburant augmenter, sans compter les machines elles-mêmes.

A - 4.1.3. Changement d'usage des sols direct et indirect

Le changement d'affectation des sols (CAS), aussi appelé changement d'usage des sols (en anglais Land Use Change), est un impact environnemental qui n'apparaît que lors d'une ACV conséquentielle. Il s'agit d'une modification des émissions liées à l'exploitation de la terre, suite à un changement de pratiques agricoles. Par exemple, lorsque des terres précédemment utilisées pour l'agriculture peu intensive, comme des pâtures, sont mises en culture, le travail du sol plus important (labour, fertilisation, etc.) entraîne d'importants dégagements de carbone [Gitz, 2004; Gitz & Ciais, 2003]. On parle alors de changement direct d'affectation des sols.

Le changement indirect d'affectation des sols (Indirect Land Use Change) peut survenir lorsque des cultures énergétiques remplacent des cultures alimentaires et que ces dernières sont déplacées sur d'autres terres. Il n'y a alors pas nécessairement d'émissions supplémentaires sur la parcelle initiale, mais ailleurs sur le territoire [European Commission, 2017].

La Figure 13 présente le cycle du carbone d'un écosystème agricole ou forestier [IPCC, 2006]. Le bilan carbone d'un écosystème est la somme des bilans de chaque compartiment. Le bilan global dépend de la terre et de son utilisation, mais varie peu d'une année sur l'autre tant que l'usage de la terre

reste le même. Un changement d'affectation peut modifier tous les flux de carbone. L'absorption, les transferts entre compartiments, la décomposition, varient selon la couverture végétale ; le travail de la terre modifie les émissions ponctuelles.

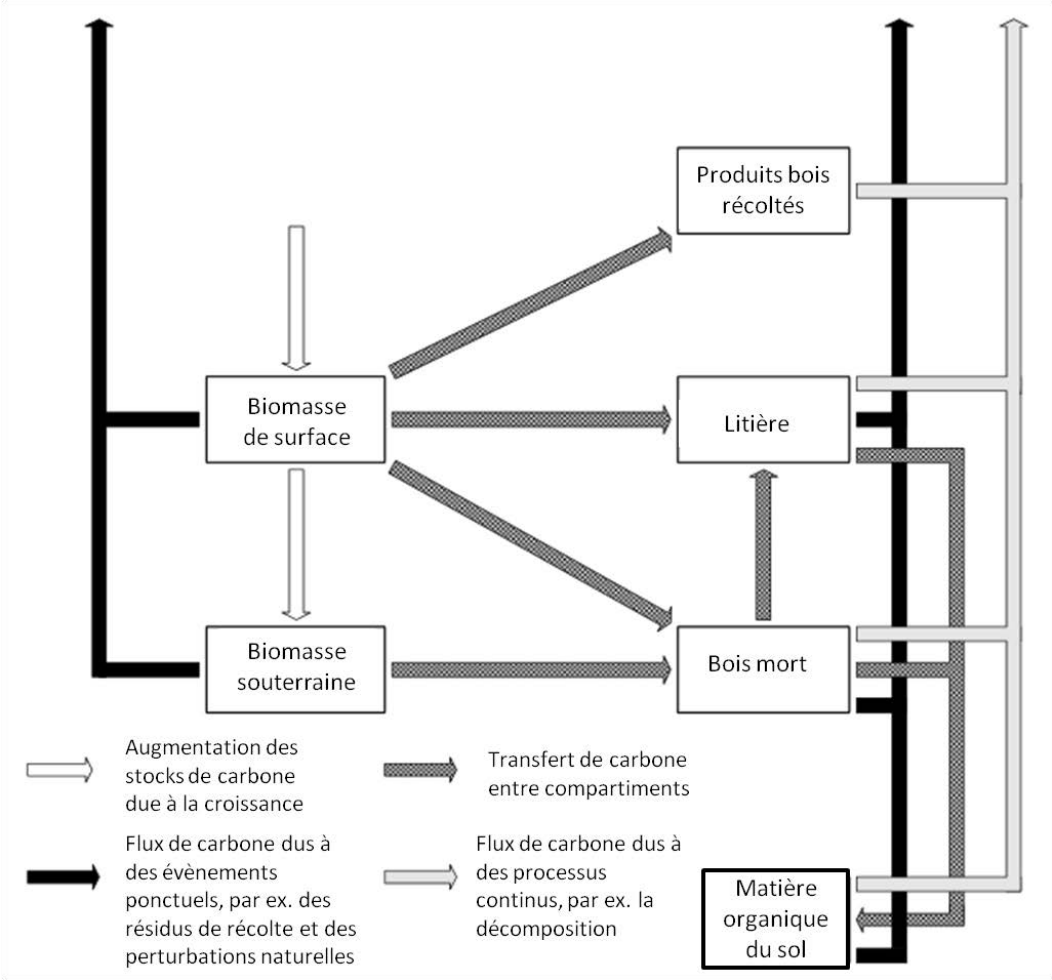


Figure 13: Cycle du carbone des écosystèmes agricoles ou forestiers montrant les flux de carbone entrant et sortant du système ainsi que entre les 5 compartiments du système [IPCC, 2006]

Le changement d'affectation des sols joue un large rôle dans le bilan environnemental des agro-carburants, et notamment les biocarburants de 1ère génération : éthanol produit à partir de plantes à sucre ou de leur résidus, diesel de synthèse à partir de plantes oléagineuses. Les premiers bilans d'émissions de GES des biocarburants étaient largement favorables, la plupart des études concluant à une réduction des gaz à effet de serre de 20% à 60% par rapport aux carburants fossiles [FAO, 2008]. Cependant, ces études ne prenaient pas en compte le CAS.

L'article publié par Searchinger *et al.* en 2008 a été le premier à démontrer l'importance du CAS dans le calcul du bilan GES des biocarburants, et à montrer que ce facteur réduit fortement l'écart entre les bilans GES des biocarburants et des carburants fossiles [Searchinger et al., 2008]. Les études plus récentes prennent garde à bien inclure le CAS dans leurs calculs [ADEME, 2012b].

Le CAS est à prendre en compte dès l'étape de définition des scénarios. Ensuite il faut connaître le niveau d'émission des terres avant et après changement de culture [IPCC, 2006]. En l'absence de données précises, on peut utiliser les données du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC, en anglais IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) sur la séquestration carbone des sols, les émissions liées au labour etc. (Tableau 7 par exemple) [ADEME, 2010a]. Les incertitudes sur le calcul des impacts de changement d'affectation des sols sont importantes (20% minimum).

Tableau 7: Séquestration de carbone dans différentes catégories de terres ([ADEME, 2010a], synthétisé d'après les calculs du GIEC)

Catégorie de terres	Stock carbone dans le sol (tonnes C/ha)	Stock carbone au-dessus du sol (tonnes C/ha)	Stock total de carbone dans le sol et au-dessus (tonnes C/ha)
Forêt tempérée	63	73,3	136,3
Forêt tropicale	60	187,5	247,5
Savane	35	81,5	116,5
Pâtures	63	6,3	69,3
Cultures	46,9	5	51,9
Canne à sucre	60	25	85
Culture permanente (ex palmier à huile)	60	50	110

Les variations d'impact entre deux scénarios de changement d'affectation des sols peuvent être très importantes. Par exemple, la Figure 14 présente le résultat de l'ACV de la production de biodiesel à partir d'huile de palme, pour plusieurs scénarios de CAS [ADEME, 2010a].

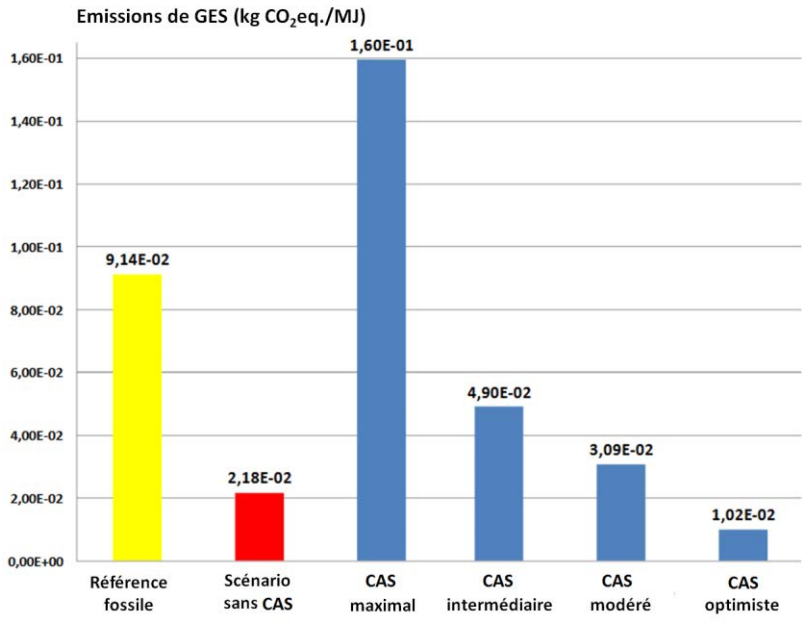


Figure 14: Emissions de GES de biodiesel à base d'huile de palme - simulations de l'impact potentiel du changement d'affectation des sols (CAS) [ADEME, 2010a]

Le scénario de CAS maximal suppose qu'un hectare de palmiers à huile (stock de carbone total 110 tonnes C/ha) remplace un hectare de forêt tropicale primaire (247,5 tonnes C/ha). La grande différence entre le stock de carbone sur ces deux types de terre entraîne un dégagement important de GES. La différence est importante avec les autres scénarios, qui supposent soit un remplacement de forêts dégradées (scénario intermédiaire), soit une production à 50% sur de l'ancienne forêt primaire, et à 50% par augmentation des rendements de plantations existantes (scénario modéré), soit encore l'utilisation de terres agricoles dégradées (scénario optimiste). Il s'agit ici de CAS direct.

Le CAS indirect est plus difficile à évaluer, et demande des connaissances importantes sur les marchés agricoles pour anticiper les changements d'usage. Cet impact est encore difficile à comptabiliser. Une projection de Lapola *et al.* (2010) sur la production de biocarburants au Brésil montre un impact faible du CAS direct, mais un poids très important du CAS indirect dans le bilan environnemental des biocarburants [Lapola et al., 2010].

Le changement d'affectation des sols est une façon de prendre en compte le territoire dans une analyse ACV : territoire de production, territoire de compensation, etc. Une autre approche en développement est l'ACV territoriale.

A - 4.1.4. ACV territoriale

L'ACV territoriale cherche à déterminer les impacts environnementaux des processus et des activités à l'échelle d'un territoire, par exemple une commune. La méthode d'ACV territoriale a été développée pour répondre à un manque de démarche formalisée permettant de réaliser des évaluations environnementales préalables à la mise en place de plans ou de programmes en lien avec l'aménagement du territoire [Loiseau, 2014]. C'est un développement récent et encore peu répandu dans le domaine de l'ACV.

Il faut prendre garde à la confusion possible entre une ACV territoriale et une ACV spatialisée. L'ACV territoriale se définit par sa frontière géographique ; c'est la phase d'ICV qui demande un travail particulier par rapport à une ACV sur seulement une chaîne de production, par exemple. L'ACV spatialisée consiste à prendre des facteurs de caractérisation plus spécifiques à la zone géographique où est implanté le projet étudié (pour les impacts locaux), par exemple si la zone est plus sensible que la moyenne à l'eutrophisation où à l'acidification des terres. Les deux approches peuvent être combinées, comme le présente la Figure 15 [Nitschelm et al., 2016].

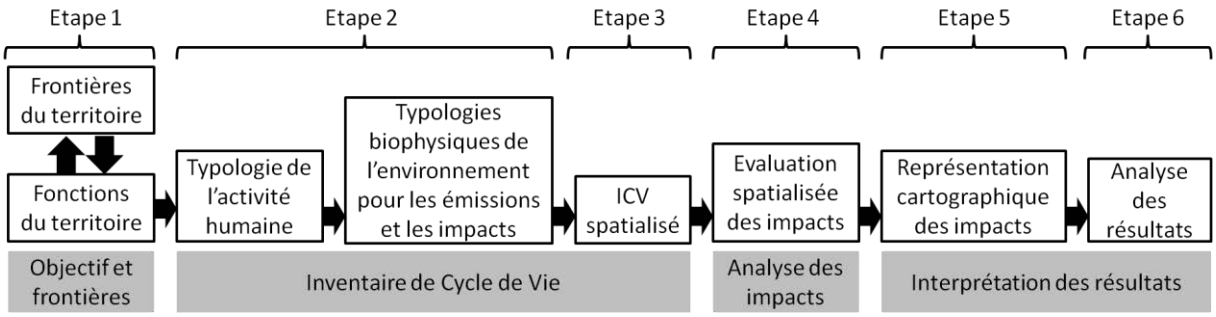


Figure 15: Etapes de l'ACV Territoriale Spatialisée (à partir de [Nitschelm et al., 2016])

A - 4.1.5. Impacts environnementaux potentiels : catégories mid-point et end-point

Les impacts environnementaux potentiels sont classifiés en deux grandes catégories : les impacts mid-point (évaluation des problèmes) et les impacts end-point (évaluation des dommages). Les impacts mid-point se situent vers le milieu de la chaîne de causalité (par exemple, acidification du milieu marin), alors que les impacts end-point se situent à la fin (par exemple, augmentation de la mortalité des coraux, perte de biodiversité). Comme l'illustre la Figure 16, le calcul des indicateurs end-point introduit un niveau d'incertitude supplémentaire [Aissani et al., 2012]. C'est pourquoi ils sont peu utilisés dans les publications scientifiques [Bare et al., 2000].

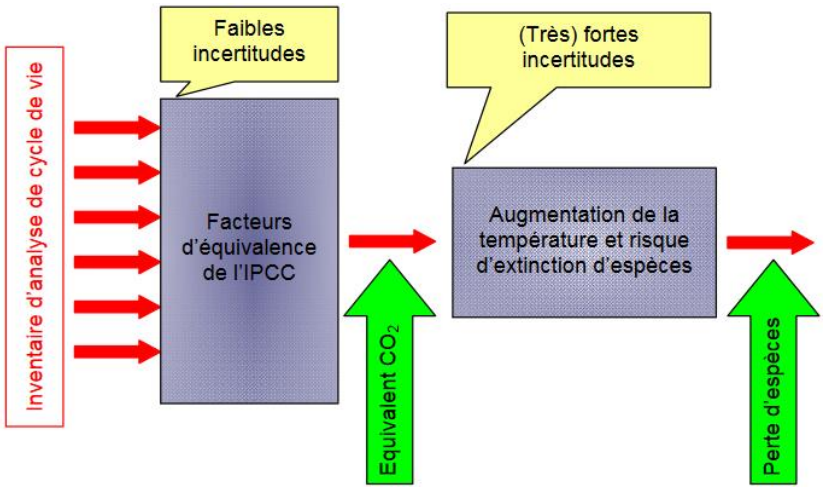


Figure 16: Incertitudes des modèles d'analyse des impacts à mi-parcours et finaux, exemple du changement climatique issu de la méthode ReCiPe [Aissani et al., 2012]

A - 4.1.6. Les méthodes ReCiPe et CML2001

La méthode CML 2001 a été développée par l'Université de Leiden en 1992 ; ses facteurs de caractérisation ont été réajustés en 2001 suite aux progrès de la caractérisation des impacts [EarthShift, n.d.; Université de Leiden, n.d.]. Elle couvre environ 1000 substances [Aissani et al., 2012]. Bien qu'elle soit assez ancienne, cette méthode est encore largement utilisée.

La méthode ReCiPe propose 16 indicateurs orientés mid-point et trois indicateurs orientés end-point (impacts sur la santé humaine, sur les écosystèmes, sur la disponibilité des ressources). Elle a été développée par l'institut néerlandais pour la santé publique et l'environnement sur la base de la méthode CML [RIVM, n.d.]. La dernière réévaluation de ses facteurs de caractérisation a eu lieu en 2013. Environ 3000 substances sont couvertes par cette méthode, ce qui en fait l'une des plus complètes parmi l'ensemble des méthodes d'évaluation des impacts actuellement disponibles [Aissani et al., 2012].

Les impacts mid-point des deux méthodes sont présentés dans le Tableau 8. Sur les 11 indicateurs de la méthode CML, huit sont identiques à des indicateurs de la méthode ReCiPe, mais sont parfois exprimés dans une unité différente. Les trois autres sont des versions moins spécifiques des impacts ReCiPe. Par exemple pour l'eutrophisation, la méthode ReCiPe distingue les eaux douces du milieu marin, ce que ne fait pas la méthode CML.

Tableau 8: Catégories d'impacts mid-point et unités pour les méthodes ReCiPe et CML2001

Catégories d'impact	Précision	ReCiPe	CML 2001
Changement climatique		kg CO_2-équivalent	kg CO_2-équivalent
Qualité de l'air	Formation d'oxydants photochimiques	kg de Composés Organiques Volatiles Non Méthaniques (COVNM)	kg éthylène-éq.
	Formation de particules	kg PM10-éq.	
	Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC-11 éq.	kg CFC-11 éq.
	Ressources fossiles	kg de pétrole-éq.	MJ
	Minéraux		kg Sb-éq.
	Métaux	kg Fe-éq.	
	Eau	m^3	
Acidification			kg SO_2-éq.
	Milieu terrestre	kg SO_2-éq.	
Eutrophisation			kg P-éq.
	Eaux douces	kg P-éq.	
	Milieu marin	kg N-éq.	
Ecotoxicité	Eaux douces	kg 1,4-DB-éq.	kg DCB-éq.
	Milieu marin	kg 1,4-DB-éq.	kg DCB-éq.
	Milieu terrestre	kg 1,4-DB-éq.	kg DCB-éq.
Toxicité pour l'Homme		kg 1,4-DB-éq.	kg DCB-éq.
Radiations ionisantes		kg U235-éq.	

A - 4.1.7. ACV dynamique

A - 4.1.7.1. Le problème de la comptabilisation du CO_2 en ACV

L'Analyse de Cycle de Vie classique comptabilise toutes les émissions du système comme si elles se produisaient simultanément, à l'instant zéro. Il a été démontré que cette approche tend à exagérer le potentiel de réchauffement climatique des émissions qui ont lieu au cours de la vie, surtout sur les horizons temporels courts, et que cela augmente l'importance relative des émissions de fin de vie, qu'elles soient positives ou négatives (par exemple si l'on considère du recyclage) [Kendall, 2012]. Elle pose également des problèmes pour comptabiliser les émissions de la bioénergie, notamment le bois de forêt qui présente une longue période d'absorption du CO_2. Le CO_2 ayant une longue durée de séjour dans l'atmosphère (de l'ordre du siècle), la date à laquelle il est absorbé ou relâché peut donner une grande variation dans son impact sur le réchauffement climatique. Ce CO_2 absorbé n'est d'ailleurs pas comptabilisé de la même manière dans toutes les méthodes d'évaluation des impacts, ce qui pose des problèmes de comparaison d'études et de scénarios. Par exemple, la méthode CML le soustrait à 100% au CO_2 émis, alors que la méthode ReCiPe n'en tient absolument pas compte.

La part de gaz restant dans l'atmosphère après une émission à l'an zéro s'exprime pour le CO et le CH_4 par une équation de la forme $e^{-t/\tau}$, où τ est une constante de temps propre à chaque gaz, couramment appelée temps de rétention. Le temps de rétention du CH_4 est de 12 ans, celui du CO de 3 mois, soit 0,25 années.

Le CO_2 se comporte différemment, notamment en raison des interactions entre l'atmosphère et l'océan. La part résiduelle de gaz dans l'atmosphère est approchée par une somme d'exponentielles [IPCC, 2013] :

$$a_0 + a_1 \times e^{-t/\tau_1} + a_2 \times e^{-t/\tau_2} + a_3 \times e^{-t/\tau_3} \quad \text{(E1)}$$

Les valeurs des paramètres sont données dans le Tableau 9 [IPCC, 2013].

Tableau 9: Valeur des paramètres pour la somme d'exponentielles décrivant la fraction restante de CO_2 dans l'atmosphère après une émission ponctuelle [IPCC, 2013]

Indice i	i=0	i=1	i=2	i=3
Coefficient a_i (sans unité)	0,2175	0,2240	0,2824	0,2763
Echelle temporelle τ_i (années)	-	394,4	36,54	4,304

La Figure 17 illustre la variation de temps de rétention dans l'atmosphère entre CO_2, CH_4 et CO, à partir de ces équations [IPCC, 2013].

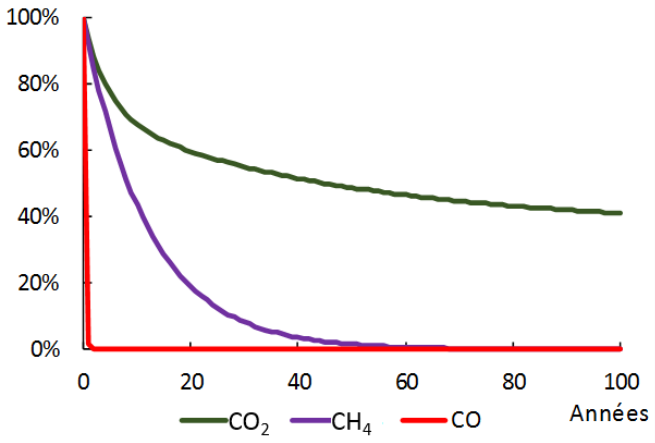


Figure 17: Part de gaz restant dans l'atmosphère au cours du temps, pour une émission à t=0 (CO_2, CH_4, CO), à partir de [IPCC, 2013]

On peut constater que le CO_2 a une période de rétention beaucoup plus longue que le CO et le CH_4, et qu'au contraire de ceux-ci, il ne disparaît jamais complètement de l'atmosphère.

A - 4.1.7.2. L'approche ACV dynamique

Une façon de prendre en compte la période d'absorption, en complément de l'ACV classique, est l'approche ACV dynamique. La méthode développée par Levasseur et al. (2010) donne la valeur absolue du Potentiel de Réchauffement Climatique (Absolute Global Warming Potential, AGWP) en fonction du temps [Levasseur et al., 2010]. Elle est calculée par pas de temps de un an, puisque c'est l'unité dans laquelle sont donnés les temps de rétention des gaz à effet de serre.

Le potentiel absolu de réchauffement climatique de 1 kg de CO_2 émis à l'an zéro, pour toute année t ($t \geq 0$), est noté $AGWP_{CO2}(t)$. Il est obtenu en intégrant par rapport au temps le produit de la fraction de gaz restante et de l'efficacité radiative du CO_2 ($1{,}7517 \times 10^{-15}$ $W \cdot m^{-2} \cdot kg^{-1}$). L'efficacité radiative est la contribution instantanée au réchauffement atmosphérique pour un kilogramme de gaz. La fonction $AGWP_{CO2}(t)$ est présentée Figure 18 [IPCC, 2013].

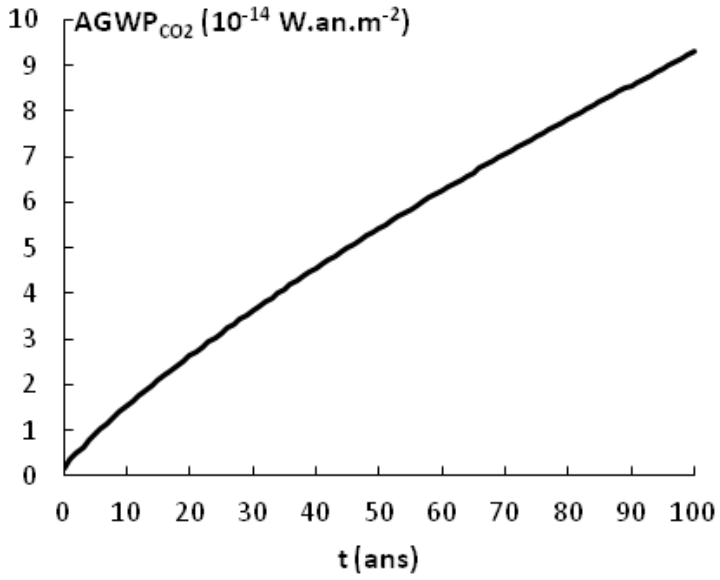


Figure 18: Potentiel Absolu de Réchauffement Climatique pour l'émission de 1 kg de CO_2 à t=0, à partir de [IPCC, 2013]

On désigne par le terme E(a) la quantité de CO_2 émise durant l'année a. E(a) peut être négative en cas d'absorption nette de CO_2. Le potentiel absolu de réchauffement climatique total à l'an t est alors donné par l'équation suivante (E2) :

$$AGWP(t) = \sum_{a=0}^{t} E(a) \times AGWP_{CO2}(t-a) \qquad \text{(E2)}$$

L'approche dynamique est disponible pour le CO_2, le méthane (CH_4) et le monoxyde de carbone (CO), car leur temps de séjour dans l'atmosphère et leur coefficient de forçage radiatif ont été évalués de manière assez fiable depuis le début des travaux du GIEC. Leur potentiel absolu de réchauffement climatique en fonction du temps est présenté Figure 19 [IPCC, 2013].

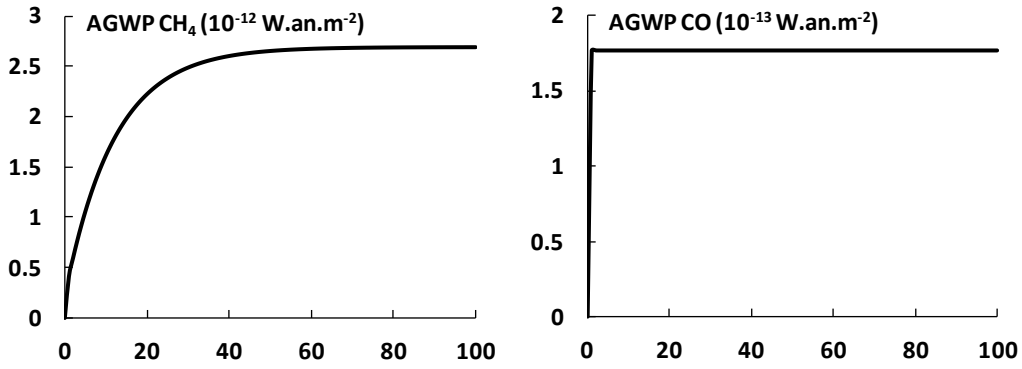


Figure 19: Potentiel Absolu de Réchauffement Climatique pour l'émission de 1 kg de CH_4 ou de CO à t=0, à partir de [IPCC, 2013]

L'incertitude sur l'efficacité radiative d'un gaz est typiquement de 10%. Cependant, une fois prises en comptes les incertitudes sur les temps de rétention et le modèle en somme d'exponentielles, l'incertitude totale sur le potentiel absolu de réchauffement climatique du CO_2 à 100 ans atteint les 25% [IPCC, 2013]. L'incertitude est comparable pour le CH_4, à 30% sur le potentiel de réchauffement absolu à 100 ans. CO_2, CH_4 et CO sont avec la vapeur d'eau les trois principaux composés de la combustion de la biomasse. Les données précises sur le temps de séjour et l'efficacité radiative des polluants mineurs, comme les composés organiques volatiles non méthaniques, ne sont pas disponibles à l'heure actuelle. Les ACV classiques utilisent une valeur moyenne de pouvoir réchauffant à 100 ans, avec une incertitude qui atteint aisément les 100%. Dans cette thèse, l'analyse sera donc concentrée sur les trois gaz principaux.

Certains chercheurs préfèrent utiliser l'indicateur end-point Potentiel Absolu de Changement de Température (Absolute Global Temperature change Potential, AGTP) [Shine et al., 2005]. Cet indicateur peut être plus parlant pour comparer des scénarios, mais comme tous les indicateurs end-point, il introduit un degré d'incertitude supplémentaire.

L'ACV dynamique a été développée en réponse au problème spécifique du CO_2 dans le cadre des cultures à longue durée de croissance comme les forêts. Les autres impacts sur l'environnement, tels que l'acidification terrestre, l'eutrophisation, etc., ne font pas l'objet d'une analyse dynamique. Le deuxième plus grand impact des émissions de CO_2 est l'acidification du milieu marin. On peut imaginer un développement futur de l'ACV dynamique pour cet impact.

A - 4.1.7.3. Approche ACV hybride

Pour conserver la facilité d'utilisation de l'ACV classique tout en intégrant la croissance de la forêt de manière plus précise, une approche possible serait de calculer un facteur de caractérisation pour l'impact Changement Climatique spécifique au CO_2 issu du territoire forestier visé grâce à l'ACV dynamique, puis d'utiliser ces facteurs dans l'ACV classique. Le calcul de l'ACV dynamique n'est ainsi fait qu'une seule fois. Cherubini, Bright et Stromman ont ainsi calculé les facteurs de caractérisation spécifiques à plusieurs régions et méthodes de sylviculture, et obtenu des résultats relativement dispersés [Cherubini et al., 2012].

Les facteurs de caractérisation obtenus varient entre -0.11 et 0.08 en tenant compte des variations d'albédo. L'albédo est le pouvoir réfléchissant des surfaces, une valeur sans unité qui représente le rapport de l'énergie lumineuse réfléchie à l'énergie lumineuse incidente. Plus une surface est

sombre, plus son albédo est faible ; la part d'énergie lumineuse absorbée, puis réémise sous forme de rayonnement infrarouge, est plus élevée. C'est ce rayonnement infrarouge qui est partiellement capturé par les gaz à effet de serre de l'atmosphère. L'albédo varie avec le type de forêt et l'état de croissance, la présence de neige etc. Le facteur de caractérisation le plus faible est obtenu pour une forêt du Canada, qui bénéficie d'une couverture neigeuse pendant plusieurs mois dans l'année, et a donc un albédo moyennement élevé. Dans le même cas, l'albédo de la forêt de Norvège lui permet d'abaisser son facteur de caractérisation de 0.11 (facteur de caractérisation uniquement lié aux émissions et consommations de CO_2) à -0.02, alors que le nord-ouest des Etats-Unis ne baisse que de 0.10 à 0.08.

A - 4.2. Analyse des études ACV biomasse-énergie

Les études ACV sur la biomasse-énergie varient grandement en termes de méthode, de frontières et de problématique. Un échantillon de littérature est présenté en Annexe II, Tableau 28. Quelques-unes de ces études sont discutées en détails plus loin.

L'unité fonctionnelle la plus répandue est l'unité d'énergie livrée au consommateur final ; quelques études comparent aussi les résultats par hectare de terrain exploité pour la production de biomasse. Toutes les études s'intéressent à l'impact sur le changement climatique mais seule une étude sur deux inclut d'autres impacts comme l'eutrophisation ou l'impact sur la santé humaine. Quelques études commencent à étudier le problème du CO_2 biogénique et de sa comptabilisation, mais beaucoup utilisent encore un facteur de caractérisation nul pour les émissions de CO_2 issues de la biomasse.

Les variations entre les scénarios étudiés, les hypothèses, et les méthodes, entraînent une grande variabilité dans les résultats, même pour une même utilisation de la biomasse.

Le Tableau 10 présente l'impact changement climatique de scénarios à réseau de chaleur de quatre études. Les résultats varient du simple au double lorsque l'impact est positif, et l'une des études obtient même un impact négatif [Caserini et al., 2010; Eriksson et al., 2007; Guest et al., 2011; Thornley et al., 2015]. Cette valeur négative est obtenue en comptabilisant les économies de gaz naturel, pétrole et charbon effectuées grâce à l'introduction du réseau de chaleur à bois.

Tableau 10: Impact changement climatique des réseaux de chaleur à bois dans la littérature

Source	Impact changement climatique de l'énergie thermique produite par un réseau de chaleur à bois, à l'horizon 100 ans
[Caserini et al., 2010]	-0,12 à -0,09 kg kg CO_2 eq./MJ (-1,08 à -0,08 tonne CO_2 eq./tonne bois sec)
[Guest et al., 2011]	0,0024 à 0,0028 kg CO_2 eq./MJ
[Thornley et al., 2015]	0,0042 kg CO_2 eq./MJ
[Eriksson et al., 2007]	0,005 kg CO_2 eq./MJ

Eriksson *et al.* (2007) ont comparé les performances environnementales de l'incinération de déchets, de la combustion de bois et de la combustion de gaz naturel, pour produire de la chaleur ou de la chaleur et de l'électricité [Eriksson et al., 2007]. Leur analyse conséquentielle prend en compte les éventuelles modifications du mix électrique. Ils obtiennent plusieurs conclusions intéressantes. Tout d'abord, l'incinération de déchets n'est intéressante que si l'alternative est la mise en décharge et non le recyclage. Ensuite, la combustion de la biomasse a de meilleures performances environnementales si elle produit à la fois de la chaleur et de l'électricité, surtout si l'électricité remplacée est à haut contenu fossile. Ce dernier point dépend des prix relatifs des énergies renouvelables et des carburants fossiles. Cependant, il faut garder en mémoire que la méthode de caractérisation utilisée considère le CO_2 issu de la combustion du bois comme neutre du point de vue du changement climatique, ce qui comme on l'a vu plus haut, est maintenant considéré comme une hypothèse fausse.

Guest *et al.* (2013) présentent une analyse dynamique de l'impact changement climatique de plusieurs scénarios exploitant les résidus forestiers [Guest et al., 2013]. Une fraction variable des résidus est extraite de la forêt et utilisée pour produire de la chaleur et/ou de l'électricité. La Figure 20 présente les flux de CO_2 et l'impact Changement Potentiel de Température instantané et cumulé calculés pour chaque scénario, pour produire 1MWh d'énergie thermique.

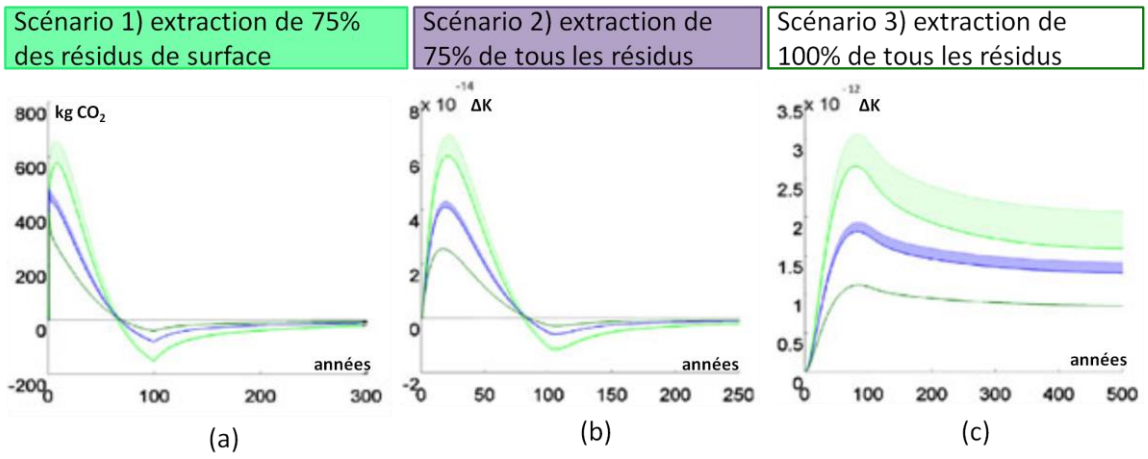


Figure 20: (a) Flux de CO_2, (b) Potentiel de Changement de Température Instantané et (c) Potentiel de Changement de Température cumulé pour la production de 1MWh d'énergie thermique suivant 3 scénarios d'exploitation de résidus forestiers [Guest et al., 2013]

On constate que l'impact sur le changement climatique diminue lorsque la proportion de résidus extraite augmente. Ceci est lié au devenir de la fraction résiduelle laissée en forêt. En effet, cette fraction se décompose et produit du dioxyde de carbone et du méthane, sans fournir d'énergie au système. Puisque les émissions dues à l'extraction et à la combustion des résidus sont constantes pour une même quantité de bois, le calcul favorise une extraction totale. Cependant cette conclusion ne prend pas en compte la problématique de l'appauvrissement des sols. En effet, les résidus sont riches en minéraux et leur export perturbe la régénération du sol. Ceci pourrait à terme conduire à une baisse de la fertilité et donc du taux d'absorption de CO_2 des forêts concernées.

Comme le montre l'échantillon de littérature présenté dans le Tableau 28, la plupart des Inventaires de Cycle de Vie s'appuient uniquement sur des données de la littérature. Ces données sont un point de départ indispensable, mais leur usage seul ne permet pas d'assurer le bouclage du bilan élémentaire et énergétique de la filière. La croissance de la forêt est également rarement considérée ; lorsqu'elle l'est, c'est le plus souvent à partir d'une valeur moyenne de croissance annuelle, considérée comme constante.

Dans cette thèse, nous avons choisi d'utiliser des modèles de combustion pour obtenir un bilan matière précis de cette étape, ainsi que des modèles de croissance de forêt pour pouvoir effectuer une analyse ACV dynamique en complément de l'ACV attributionnelle. Nous présentons ci-dessous la modélisation de la filière bois-énergie et de la combustion du bois.

A - 5. Modélisation de la filière bois-énergie

A - 5.1. Modélisation de la croissance forestière

A - 5.1.1. Les modèles forestiers dans la littérature

On peut définir deux catégories de modèles de croissance forestière en fonction de l'approche utilisée : les modèles éco-physiologiques qui tentent de reproduire les mécanismes physiologiques de la croissance et les modèles empiriques qui sont basés sur des relations statistiques.

Les modèles dits « empiriques » se fondent sur des données d'inventaire forestier remontant parfois à plus d'un siècle. Ils prévoient la croissance d'une espèce par parcelle, en fonction de la classe de fertilité du sol et du régime de sylviculture appliqué. Par exemple, le modèle FAGACEES s'applique aux parcelles de hêtre ou de chêne d'âge homogène [Moguédec & Dhôte, 2012].

Tous les modèles ne cherchent pas à répondre aux mêmes questions. Par exemple, le modèle de Kolström (1998) est plus spécifiquement dédié à l'étude de l'impact qualitatif de la gestion forestière sur la biodiversité dans les forêts boréales [Kolström, 1998]. Pour cela, une attention plus importante est portée à la mort des arbres et à leur décomposition. En effet, le bois en décomposition est, dans les forêts boréales, un élément clé de la biodiversité. Le modèle, appliqué à plusieurs essences résineuses, prévoit la distribution de diamètre des arbres vivants et morts dans la parcelle. L'emplacement et l'état de décomposition des arbres morts sont également estimés.

La principale restriction inhérente à ces modèles est l'impossibilité de prédire le comportement de la forêt dans des conditions inédites de climat et d'exploitation; le modèle ne peut que reproduire ce qui a été observé dans le passé. Il faut donc une autre approche pour évaluer les conséquences du changement climatique sur la croissance des forêts.

Les modèles éco-physiologiques peuvent être une solution, mais ils demandent beaucoup plus de puissance de calcul. Ils se fondent sur des équations de croissance des arbres prenant en compte la fertilité du sol et les conditions climatiques : température, humidité, concentration atmosphérique en CO_2, etc. Les équations de croissance sont ajustées pour chaque espèce, et calées sur des données d'inventaire forestier pour prédire la croissance moyenne et la distribution des diamètres des arbres parcelle par parcelle.

Les modèles « hybrides » permettent d'obtenir des estimations de certains paramètres de croissance forestière, tout en requérant moins de données qu'un modèle éco-physiologique classique [Tickle et al., 2001]. On peut citer par exemple le modèle 3-PG (Physiological Principles Predicting Growth, Principes Physiologiques Prédisant la Croissance), développé par Landsberg et Waring (1997). Le modèle 3-PG requiert des paramètres liés à la physiologie des arbres, ainsi que les données suivantes : radiation nette moyenne journalière pour chaque mois de l'année, températures extrêmes, précipitations mensuelles moyennes et estimations de la fertilité et de la capacité de rétention d'eau du sol [Landsberg & Waring, 1997]. A partir de ces éléments, le modèle estime le volume sur pied, le stockage de carbone et le diamètre moyen sur la parcelle. La prédiction du volume sur pied est assez fiable pour servir d'indicateur, les autres résultats sont plus incertains. Combiné à un modèle d'information géographique, il peut être appliqué à grande échelle [Tickle et al., 2001].

A - 5.1.1. Modélisation de la croissance de la forêt avec le modèle GO+

Le modèle GO+ est un modèle éco-physiologique de croissance de la forêt développé par l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) à l'UMR ISPA de Bordeaux [Loustau et al., 2012].

Le modèle GO+ a été initialement développé pour le Pin maritime (*Pinus pinaster*) dans la région des Landes (sud-ouest de la France) et a été adapté pour le hêtre commun (*Fagus sylvatica*), le pin Douglas et l'Eucalyptus. Le modèle, présenté en Figure 21, consiste en quatre compartiments : la biomasse aérienne des arbres, le sous-étage, le sol et l'eau souterraine. Le modèle calcule les échanges de matière et d'énergie entre ces compartiments et l'atmosphère et actualise le nombre d'arbres de la parcelle, leur hauteur et diamètre moyen, et les stocks de carbone de chaque compartiment.

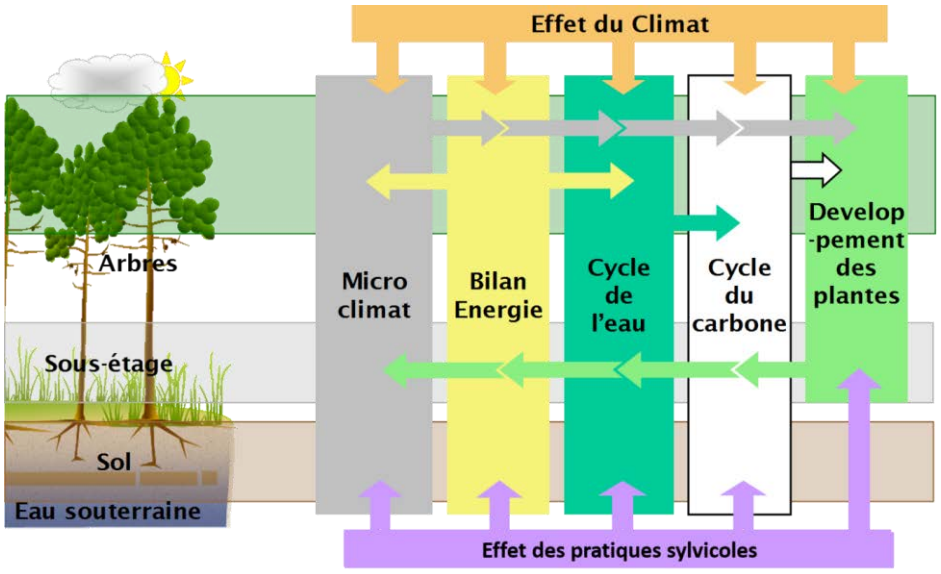


Figure 21: La forêt comme procédé dans le modèle GO+

Le territoire est divisé selon une grille de 8×8km, suivant le maillage SAFRAN utilisé par le modèle climatique ARPEGE [Météo-France, n.d.]. Les simulations peuvent couvrir jusqu'à 150 ans. La croissance de la forêt et le cycle du carbone modélisés par GO+ sont sensibles aux conditions météorologiques, stationnelles (latitude, altitude, classe de fertilité, réserve utile en eau – quantité maximale d'eau que le sol peut absorber et restituer aux plantes) et à la gestion forestière (âge moyen de la forêt, régime d'éclaircies et coupes, préparation du sol et régénération).

Dans les simulations utilisées dans cette thèse, trois classes de fertilité du sol sont prises en compte : 0, 1, 2. La classe de fertilité 0 produit les arbres les plus hauts pour un même diamètre ; la qualité du sol diminue dans les classes 1 et 2. L'âge moyen initial du peuplement principal de Pin maritime est discrétisé en tranches de cinq ans, de 0 (0 à 5 ans) à 9 (45 ans et plus).

A - 5.1.2. Modélisation de la transformation du bois avec l'outil CAT (Carbon Assessment Tool)

L'outil CAT (Carbon Assessment Tool) sert à modéliser la filière bois après la récolte, et à calculer les émissions de gaz à effet de serre liées à la transformation primaire du bois [Pichancourt et al., soumis]. Il a été initialement développé pour une utilisation avec la plateforme CAPSIS (Computer-Aided Projection of Strategies In Silviculture), un outil de modélisation de la filière bois qui intègre plusieurs modèles de croissance, notamment FAGACEES [Dufour-Kowalski et al., 2012; Moguédec & Dhôte, 2012]. Dans cette thèse, CAT est couplé avec le modèle GO+ pour calculer la répartition des produits bois issus de la forêt landaise modélisée par ce dernier.

La filière est définie par l'utilisateur à partir de la taille des grumes (troncs abattus et ébranchés). En fonction des dimensions des billons, un pourcentage du bois part en sciage – construction/ameublement/emballage, une partie en trituration – pâte à papier/agglomérés, et une partie en bois-énergie. L'outil prend en compte la durée de vie moyenne de chaque produit pour intégrer leur recyclage et/ou leur envoi en décharge.

A - 5.2. Modélisation de la combustion du bois

Le procédé de combustion est complexe : il associe différentes étapes (séchage, combustion, récupération de la chaleur, etc.) et de nombreux mécanismes physico-chimiques (séchage, réactions de pyrolyse et oxydation des gaz et goudrons de pyrolyse, aérodynamique, transferts de chaleur et de matière).

Des modèles d'appareils de combustion avancés ont été développés. Ces modèles couplent une modélisation CFD (Computational Fluid Dynamics) de l'aérodynamique et des cinétiques chimiques

détaillées [Bugge et al., 2015]. Ces modèles sont performants pour optimiser la conception des appareils de combustion, par exemple pour localiser les zones froides qui peuvent être à l'origine de polluants, mais ils sont encore trop peu précis pour prédire quantitativement les rendements matière des principaux polluants. Or nous avons vu que pour les études d'ACV, il est important d'avoir un bon ICV et notamment des bilans matière et énergie des procédés avec une bonne précision sur les polluants.

Une autre approche consiste à utiliser des données de la littérature (g de polluants émis / kg de bois, rendements énergétiques) pour préciser l'ICV sans une réelle modélisation du procédé [McIlveen-Wright et al., 2013; Solli et al., 2009]. Mais cette approche ne permet alors pas de décrire les bilans matière et énergie du procédé.

Dans notre laboratoire, nous avons proposé une approche intermédiaire qui consiste à modéliser sous un logiciel de procédés (Aspen Plus [AspenTech, n.d.]) les procédés de combustion (ou de gazéification) [François, 2014]. Le logiciel de procédé permet de modéliser l'ensemble du procédé de combustion : du séchage à la combustion et jusqu'à la récupération de chaleur. Cette méthode combine des modules en langage FORTRAN et le logiciel de modélisation Aspen Plus® pour calculer précisément les émissions de combustion. Le réacteur de combustion est modélisé par un module Aspen Plus® « boîte noire ». Ce module appelle une sous-routine FORTRAN dans laquelle sont calculées les quantités de polluants émises en fonction de la masse de bois et du volume d'air entrant. Aspen Plus® calcule ensuite les enthalpies de réaction et les quantités de chaleur récupérée. Le principe de couplage est présenté en Figure 22.

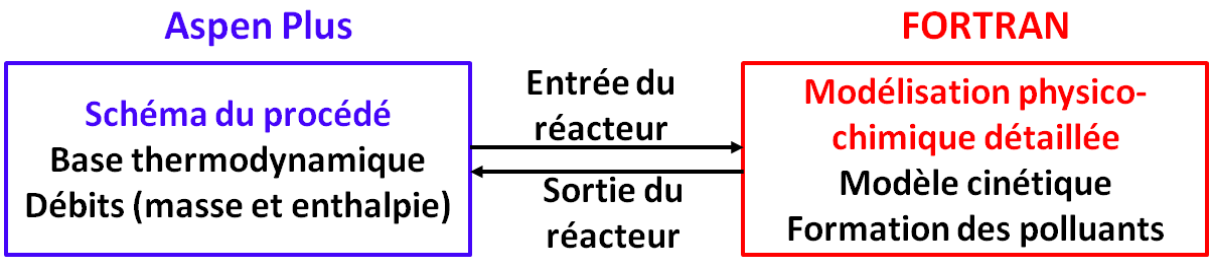


Figure 22: Principe de couplage d'un modèle Aspen Plus avec des fichiers FORTRAN extérieurs (d'après [Abdelouahed et al., 2012])

L'intérêt de cette approche est qu'elle présente une modélisation de la combustion simplifiée mais avec une bonne prédiction des émissions de polluants et un bilan matière et énergie complet du procédé.

A - 6. Analyse économique

A - 6.1. Analyse micro-économique

Les données d'ICV sont également utiles à l'analyse technico-économique des systèmes. Aux consommations de carburant et coûts associés se rajoutent l'investissement, les coûts de maintenance et d'opération etc.

Les études portant sur les systèmes industriels ou collectifs sont beaucoup plus fréquentes que les analyses économiques de la combustion de bois en poêle ou chaudière individuelle. Les études à l'échelle individuelle se limitent souvent à la comparaison des prix des combustibles bois avec les fossiles.

En France, par exemple, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) mène régulièrement des études sur le prix des combustibles bois, mais pas sur le coût total de la chaleur pour l'usager. Le coût par énergie primaire des combustibles bois est très inférieur à celui des fossiles, mais n'est qu'un élément du coût total de la chaleur [ADEME, 2014].

La compétitivité du bois-énergie dépend aussi du coût des alternatives fossiles. Une étude menée aux Etats-Unis par Wilson et al. a démontré qu'un système de chauffage individuel à granulés de bois pouvait faire économiser 6$ par GJ par rapport à un système au fioul, mais restait 8$/GJ plus cher qu'un système à gaz naturel [Wilson et al., 2012]. Les auteurs notent que la vente de granulés de bois en vrac n'est pas encore très développée aux Etats-Unis, ce qui ajoute des coûts de conditionnement important. Les économies réalisées sont également très sensibles au taux de couverture bois du système (ici 80% de la chaleur est produite par les granulés, et 20% par du fioul).

Plusieurs études de l'ADEME et de ses partenaires ont montré que les réseaux de chaleur alimentés en majorité au bois ont des coûts moyens plus faibles que les autres, mais avec une part plus importante des coûts d'opération et de maintenance [ADEME, 2010b; AMORCE/ADEME, 2015]. En effet, la rentabilité de ces chaufferies est directement liée à leur taux de couverture bois, et donc à la disponibilité effective de la chaufferie ainsi qu'aux rendements de combustion et de distribution. Les combustibles solides demandent une surveillance régulière de la chaudière pour un réglage optimal de la combustion et pour limiter la formation de mâchefers. Il est donc nécessaire d'avoir du personnel compétent et une maintenance attentive [ADEME, 2010b].

Le bois est moins intéressant pour produire conjointement de la chaleur et de l'électricité. Par exemple, une étude menée aux Pays-Bas sur différents systèmes de combustion ou de gazéification a démontré que, au prix de marché du bois « propre », aucun ne serait compétitif avec le mix énergétique déjà présent [Dornburg & Faaij, 2001]. Les systèmes à gazéification sont cependant plus efficaces que les systèmes à combustion, et pourraient devenir intéressants s'ils étaient alimentés avec des déchets de bois.

De la même façon, une étude comparant des systèmes chaleur & électricité à base de bois à leur équivalent fossile dans plusieurs pays européens montre que les solutions bois sont rarement moins chères que les alternatives fossiles. Les deux seuls sites de production où cela est vrai sont alimentés par des résidus forestiers et des déchets de scierie, deux combustibles bois à très faible coût [Groscurth et al., 2000].

Dans cette thèse, une analyse technico-économique basée sur des données de la littérature nous permet de comparer le coût des différentes solutions de chauffage et de le mettre en perspective avec leurs performances environnementales.

A - 6.2. Analyse macro-économique

Pour élargir la perspective sur la biomasse-énergie, le dernier chapitre de cette thèse est consacré à une analyse macro-économique à l'échelle mondiale. Les analyses à l'échelle mondiale n'ont pas pour but d'informer des consommateurs ou des acteurs politiques, mais d'évaluer les potentiels de production de la bioénergie et d'étudier les effets de politiques climatiques, fiscales, ou agricoles sur le marché, le prix des terres, celui des productions alimentaires etc. [Havlík et al., 2011; Popp et al., 2011; Rose et al., 2013; Wise et al., 2009].

De nombreux modèles ont été développés pour tenter de quantifier et de caractériser la place de la biomasse dans le futur système énergétique mondial. La première question est celle des quantités de biomasse disponibles pour la production d'énergie. En effet, la mise en place et l'évaluation des politiques de promotion de la bioénergie nécessitent une connaissance du potentiel de production à l'échelle du territoire visé.

Le potentiel de production dépend des conditions envisagées. Le potentiel technique dépend des surfaces disponibles et des rendements de production envisageables sur ces terres. Si l'on prend en compte les coûts de production, on peut obtenir pour un plafond de coût donné le potentiel économique, strictement inférieur au potentiel technique. Enfin, des considérations écologiques liées à la consommation d'eau, à l'utilisation de fertilisants, et à la préservation des services écosystémiques, peuvent venir réduire encore le potentiel de production.

A - 6.2.1. Potentiel de production de la biomasse-énergie

La Figure 23 présente pour plusieurs catégories de biomasses, les niveaux de potentiels observés dans la littérature et le degré de consensus sur ces niveaux [Creutzig et al., 2015]. Le gradient de couleur est utilisé pour montrer qualitativement le degré de consensus atteint par ces estimations, depuis le bleu (toutes les études trouvent que ce niveau peut être atteint), à violet (consensus moyen), et enfin rouge (peu d'études trouvent que ce niveau peut être atteint).

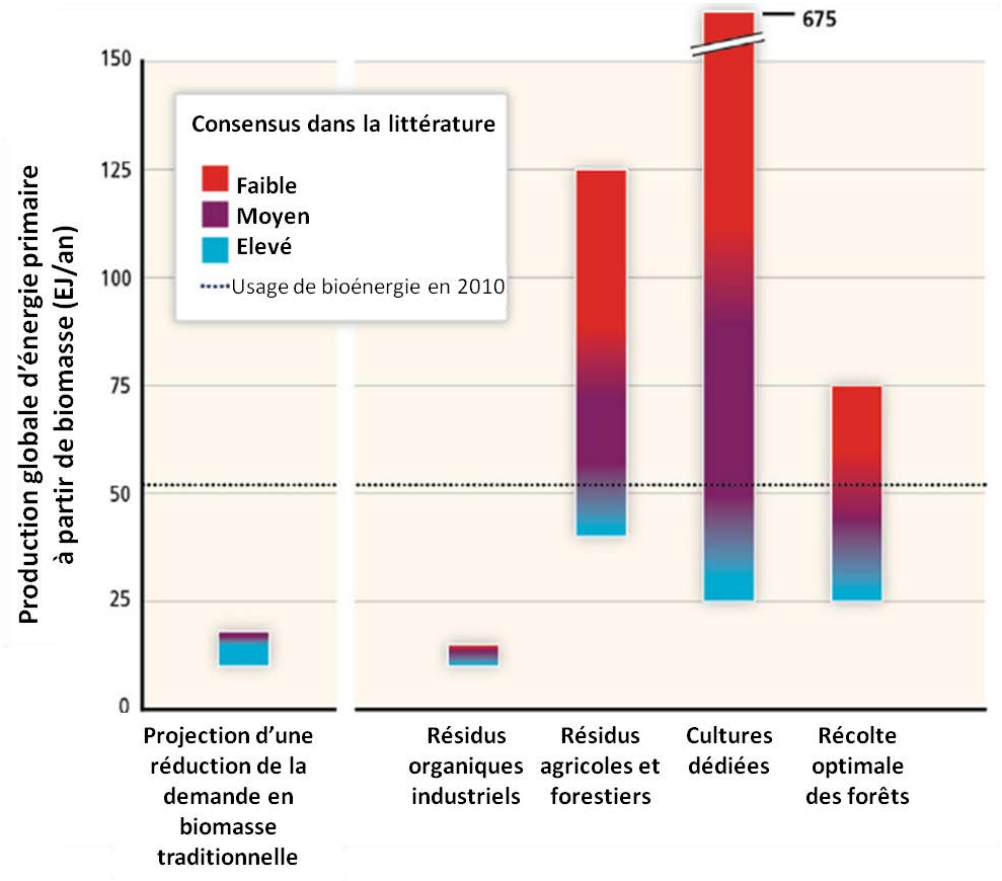


Figure 23: Potentiel technique mondial de biomasse-énergie à l'horizon 2050, pour les principales catégories de ressource, d'après [Creutzig et al., 2015]

Le potentiel technique mondial calculé dans la littérature oscille entre 60 et plus de 500 exajoules par an à l'horizon 2050. Dans l'ensemble, la communauté s'accorde sur la possibilité de produire environ 60 EJ par an. Le consensus se détériore à partir de 100-140 EJ par an environ.

Le Tableau 11 présente le potentiel calculé par quelques études de la littérature, ainsi que les méthodes utilisées.

Tableau 11: Revue de littérature des modèles de potentiel de bioénergie mondial

Source	Horizon temporel	Potentiel de production estimé (énergie primaire, EJ/an)	Sources de biomasse	Echelle d'analyse spatiale	Méthodes
[Mendu et al., 2012]	Actuel	0,468	Résidus agricoles ligneux	Globale par grille de 5min de longitude par 5min de latitude	Estimation des rendements agricoles dérivés de la littérature et des données de la FAO pour l'année 2000
[Fallot et al., 2006]	2050	62,1 – 157	Cultures dédiées	Régions tropicales	Modèle IMAGE d'usage des sols, surfaces disponibles dépendantes du scénario démographique et du régime alimentaire moyen. Rendement moyen des cultures 15 tonnes/ha/an, à 18 MJ/kg
[Wolf et al., 2003]	2050	162 – 548		Sols salins	Base de données globale sur les sols (HWSD). Rendements estimés par des modèles agricoles.
[Johansson et al., 1993; Berndes et al., 2001]	2050	206	Cultures dédiées	Globale	Différents scénarios démographiques et modes de production agricole.
[Murphy et al., 2011]	2050	450	Cultures dédiées	Globale	Modèle économique dans un cadre favorable aux énergies renouvelables
[Dornburg et al., 2010]	2050	200 – 500	Cultures dédiées	Globale	Calcul des rendements et des besoins en eau pour différents scénarios d'allocation des terres
[Rokityanskiy et al., 2007]	2050	130		Globale	Production de biocarburants uniquement
[Powell & Lenton, 2012]	2050	60 – 125			Revue de la littérature, analyses de sensibilité
[Fischer & Schrattenholzer, 2001]	2050	300 – 400	Forêts		Modèle DIMA Effet des politiques visant les propriétaires forestiers ; analyse axée sur le stockage de carbone
[Beringer et al., 2011]	2050	130 – 270	Résidus, forêts, cultures dédiées	Globale	Comparaison de plusieurs scénarios de régime alimentaire moyen et d'efficacité agricole

Source	Horizon temporel	Potentiel de production estimé (énergie primaire, EJ/an)	Sources de biomasse	Echelle d'analyse spatiale	Méthodes
[Haberl et al., 2011]	2050	64 – 161		Globale	Comparaison des scénarios SRES
[van Vuuren et al., 2009]	2050	120 – 300	Cultures dédiées	Globale	Modèle IMAGE d'usage des sols ; étude de l'influence de facteurs comme la dégradation des terres, le stress hydrique, la conservation de la biodiversité
[Smeets & Faaij, 2007]	2050	15 – 64	Forêts seules	Globale	Rendements et surfaces variables pour plusieurs catégories de forêts ; comparaison à la demande pour différents scénarios.
[Smeets et al., 2007]	2050	150 – 170	Résidus agricoles et forestiers, excédent forestier, cultures dédiées	Globale	Modèle Quickscan : rendements théoriques multipliés par surfaces disponibles (moins la demande en nourriture pour chaque scénario)
[Hoogwijk et al., 2005]	2050	130 – 410	Cultures dédiées	Globale	3 catégories de terres considérées : terres agricoles abandonnées, terres à faible rendement, autres terres actuellement non productives ; comparaison de 4 scénarios d'usage des terres (modèle IMAGE)
	2100	240 – 850			
[Lotze-Campen et al., 2010]	2055	100	Cultures dédiées	Globale par régions	A partir d'un modèle d'usage des sols, les auteurs calculent l'augmentation de rendement, le progrès technologique ou les changements d'usage des sols nécessaires pour produire 100 EJ par an en 2100
[de Vries et al., 2007]	2100	75 – 300	Cultures dédiées	Globale par région	Calcul des potentiels de production d'électricité pour l'éolien, le photovoltaïque et la biomasse, ainsi que le potentiel de biocarburants, pour 4 scénarios SRES

Comme le montrait la Figure 23, la fourchette d'évaluation du potentiel mondial est extrêmement large. Beaucoup d'hypothèses varient entre les différentes études, mais les deux plus grandes sources d'incertitude sont le scénario d'usage des sols et les rendements. En effet, les surfaces disponibles et leur productivité sont les deux piliers du calcul de potentiel, quel que soit le modèle utilisé. Les cultures énergétiques dédiées sont le principal vecteur de production, y compris dans les études qui intègrent d'autres sources de biomasse comme les résidus agricoles ou les forêts.

En règle générale, plus les hypothèses sont strictes et plus les potentiels projetés sont faibles. Par exemple, van Vuuren *et al.* (2009) considèrent des rendements réels plus faibles que les rendements théoriques et des facteurs d'accessibilité des terres variables selon la catégorie (0.75 pour les terres agricoles abandonnées, 0.50 pour les prairies naturelles, 0 pour les réserves naturelles actuelles). Cette étude prend également en compte les rendements de conversion énergétique de la biomasse. Le potentiel calculé est donc relativement faible par rapport à d'autres [van Vuuren et al., 2009].

Si la majorité des études intègrent l'évolution de la demande alimentaire à l'horizon temporel considéré, peu considèrent l'effet du changement climatique sur les rendements. Dornburg *et al.* (2010) calculent les besoins en eau liées à la production, mais n'étendent pas plus loin cette analyse [Dornburg et al., 2010]. Van Vuuren *et al.* (2009) estiment que plus de la moitié du potentiel de production se situe sur des terres à risque : soit des terres dégradées, soit des terres à la limite du stress hydrique, soit des zones à forte biodiversité, que des cultures énergétiques pourraient impacter fortement. Cette étude semble la plus complète du point de vue des considérations environnementales [van Vuuren et al., 2009].

Un autre travail soulève des questions intéressantes concernant le développement des énergies renouvelables : de Vries *et al.* (2007) calculent le potentiel de production électrique mondial en éolien, photovoltaïque, et biomasse. Ils font remarquer à juste titre que le potentiel total ne peut pas être simplement la somme des trois sources, car celles-ci entrent en compétition sur les terres. Il y a donc un arbitrage à faire à une échelle beaucoup plus rapprochée, selon le potentiel, le coût, et l'acceptabilité sociale de chaque source d'énergie [de Vries et al., 2007].

En conclusion, si les études mondiales nous donnent un aperçu des possibilités de développement de la biomasse-énergie, la mise en place de politiques dédiées nécessite des analyses plus spécifiques, à l'échelle de la région ou du pays, prenant en compte les besoins de la population, les infrastructures existantes et futures et les impacts environnementaux.

A - 6.2.2. Courbes d'offre

Le calcul du potentiel économique à différents niveaux de coûts permet de tracer les courbes d'offre de la bioénergie. Une courbe d'offre représente, en fonction du niveau de production, le coût de production d'une tonne ou d'un MJ supplémentaire. Ces courbes forment la base de toute analyse économique mondiale. La Figure 24 présente les courbes d'offre de carburants liquides issus de biomasse pour quatre scénarios de développement économique mondial [Hoogwijk et al., 2009]. La mondialisation favorise le développement des biocarburants car plus d'avancées technologiques et donc de réductions de coûts sont disponibles.

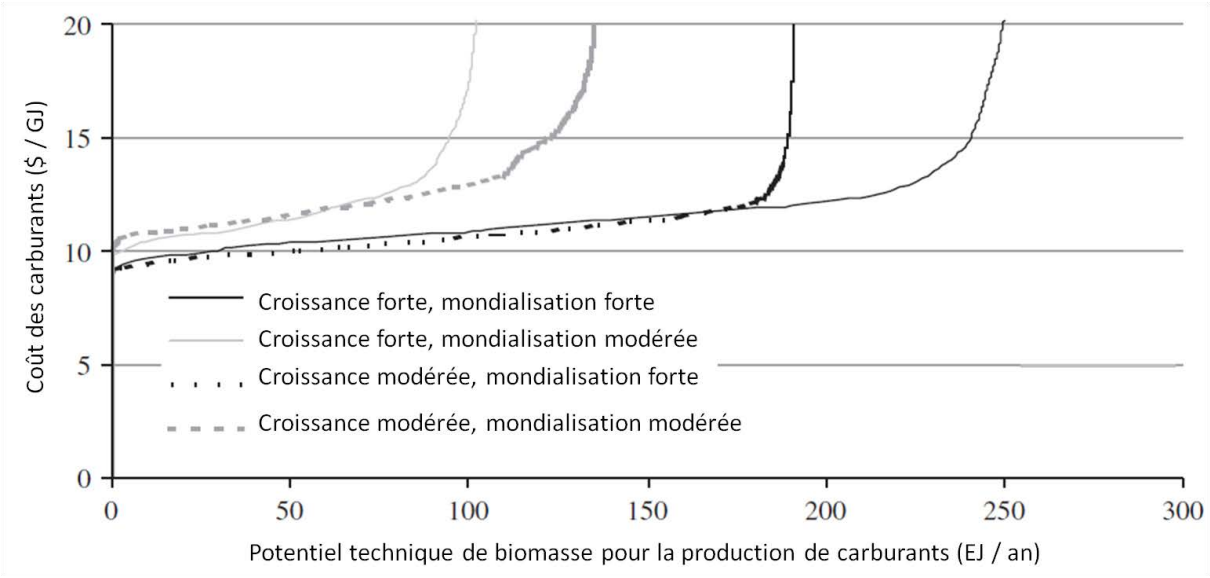


Figure 24: Courbe d'offre (année 2050) des carburants diesel issus de cultures énergétiques produites sur des terres agricoles abandonnées et des terres en jachère, pour quatre scénarios de développement économique mondial [Hoogwijk et al., 2009]

A - 6.2.3. Analyse économique mondiale

De nombreuses études ont été publiées sur le potentiel technique de production de bioénergie (§ A - 6.2.1). Cet aspect est – théoriquement - relativement simple : il suffit de multiplier les terres disponibles par leur rendement et de soustraire au résultat les besoins en nourriture. La complexité du problème augmente lorsqu'il s'agit de calculer le potentiel économique, ou le coût de production de la bioénergie. En plus de connaître les terres disponibles et leur rendement, il faut connaître les coûts de culture, de transport et de transformation de la biomasse, qui peuvent varier fortement entre régions. Ces coûts, associés aux études de potentiel, permettent d'établir les courbes de coût de la biomasse, autrement dit le coût de production d'une tonne supplémentaire pour un niveau de production donné. Ce coût marginal augmente lorsque l'on s'approche du potentiel maximal.

Les études de potentiel économique peuvent être menées à plusieurs échelles, du pays individuel à l'échelle mondiale. A l'échelle nationale, on peut citer par exemple van Dam *et al.* (2009) [van Dam et

al., 2009] sur l'Argentine, ou [Caurla, 2012] sur la France [Caurla, 2012; van Dam et al., 2009]. A l'échelle de l'Union Européenne, on peut mentionner [de Wit & Faaij, 2010]. La complexité et les incertitudes augmentent avec l'échelle d'analyse. En effet, si à l'échelle nationale il est possible d'avoir un modèle détaillé du secteur forestier et de ses interactions avec les autres acteurs économiques, comme par exemple le modèle FFSM (French Forest Sector Model, [Caurla, 2012]), il devient impossible de conserver un grain aussi fin à une échelle plus large. Les modèles économiques globaux sont donc nécessairement simplifiés par rapport aux modèles locaux. Ils regroupent généralement les pays du globe en une dizaine de grandes régions basées autant sur la géographie que sur les similarités économiques [Hourcade et al., 2010; Muratori et al., 2016; Popp et al., 2011; Wise et al., 2009]

La plupart des modèles démontrent que le déploiement de la bioénergie peut jouer un rôle décisif dans la lutte contre le changement climatique, quand l'option de capture et stockage du carbone (CSC) est disponible [Rose et al., 2013]. Les résultats quantitatifs sont très variables, en fonction des différences d'hypothèses sur les technologies retenues, l'accessibilité des terres, la flexibilité du marché etc. [Bibas & Méjean, 2014] ont montré que l'absence de CSC entraînait des efforts plus importants de réduction de la consommation d'énergie. Ces efforts commencent également plus tôt que dans les scénarios avec CSC, ceux-ci ayant une marge de manœuvre plus large due aux émissions négatives du CSC.

La prévalence de la technologie CSC dans les modèles intégrés est à considérer avec précaution, en particulier si ces projections doivent informer certaines décisions politiques. En effet les modèles considèrent la technologie comme parfaitement fonctionnelle, ce qui est faux à l'heure actuelle. Si la technologie ne se développe pas à l'échelle prévue par les modèles, et que les autres mécanismes d'atténuation ne sont pas en place pour compenser, les objectifs de température mondiale pourraient être largement dépassés [Anderson & Peters, 2016].

Outre la disponibilité de la technologie CSC, les deux autres sources d'incertitude majeures sont les rendements de production et les coûts de production de la bioénergie. Une étude de [Creutzig, 2016] a souligné l'importance des hypothèses de rendement sur les résultats d'un déploiement massif de bioénergie. Si de hauts rendements sont réalisables, la demande alimentaire et la demande de bioénergie peuvent facilement être satisfaites sans mettre en péril les écosystèmes, et des objectifs ambitieux d'atténuation du changement climatique sont atteignables. En revanche, si les rendements projetés ne sont pas atteints, une forte production de bioénergie pourrait entraîner de fortes pertes en carbone du sol et une dégradation des écosystèmes et de la biodiversité. La sécurité alimentaire pourrait aussi se détériorer. Par exemple, dans [Popp et al., 2011], l'index des prix de la nourriture augmente jusqu'à 82% en Afrique par rapport au scénario de référence. Cette étude

conclut que la bioénergie produite à partir de cultures ligno-cellulosiques dédiées peut être une contribution efficace au modèle énergétique futur, mais qu'elle a de forts risques de créer des conflits sur les terres, l'accès à l'eau et l'accès à la nourriture.

En règle générale, les modèles d'analyse intégrés et leurs hypothèses sont encore assez détachés des vraies contraintes sur l'usage des sols. D'autre part, certaines études (par exemple [Bibas & Méjean, 2014]) considèrent encore la bioénergie comme neutre en carbone, ce qui améliore artificiellement l'efficacité des scénarios à base de biomasse pour la réduction des émissions.

Concernant les coûts de production, le problème est qu'il existe encore assez peu d'études sur les coûts de production des cultures intensives de biomasse ligno-cellulosique comme les Taillis à Courte Rotation ou les herbes géantes. Le chapitre F - 1 de cette thèse est consacré à une analyse statistique des données disponibles dans la littérature, dans le but d'intégrer ces données à un modèle mondial basé sur l'usage des sols, le Nexus Land-Use (NLU) [Souty et al., 2012].

B. Présentation synthétique de la méthodologie

La revue de littérature a révélé des lacunes dans l'élaboration des Inventaires de Cycle de Vie des filières bois-énergie. Notre premier objectif est donc de fiabiliser l'ICV des filières forêts-énergie, notamment en intégrant la modélisation de la croissance de la forêt et la modélisation de la combustion du bois, et par la revue de littérature sur les étapes de récolte, transformation et transport du bois.

Plusieurs études ont déjà été réalisées sur l'ACV des réseaux de chaleur, mais très peu sur les équipements individuels, et encore moins intégrant l'ensemble de la filière [Caserini et al., 2010; Eriksson et al., 2007; Guest et al., 2011; Thornley et al., 2015]. Nous comparons donc plusieurs scénarios « ACV classique ». Enfin, une ACV dynamique est menée pour étudier l'effet de l'intensification de la sylviculture sur l'impact changement climatique des plantations.

Les limites du système étudié dans l'ACV « classique » sont présentées en Figure 25. Les flux libellés en noir sont calculés par la modélisation, d'une part de la forêt, et d'autre part de la combustion du bois.

La croissance de la forêt et sa transformation sont modélisées par le couplage des modèles GO+ et CAT pour la production de pin maritime dans les Landes (§ C - 1.1). L'association de ces deux modèles permet de comparer les effets de plusieurs scénarios de changement climatique et de sylviculture.

La croissance du hêtre est modélisée de manière simplifiée à partir d'une revue de littérature (§ C - 1.2). Cette modélisation permet de calculer la quantité de CO_2 absorbée, utilisée pour le calcul des impacts, et les quantités de bois produites, utilisées pour les étapes de récolte, transformation, transport, et combustion.

La combustion du bois dans différents équipements est modélisée sous Aspen Plus® d'après la méthode mise au point par J. François (§ C - 2) [François, 2014]. Le rendement énergétique obtenu dimensionne l'ensemble de la chaîne de production via l'application de l'unité fonctionnelle (§ C - 2.1).

Les flux libellés en violet, et notamment les consommations de carburant liées aux étapes de récolte, de transformation, et de transport de la biomasse, sont déterminés par la littérature (Tableau 3, § A - 3.2).

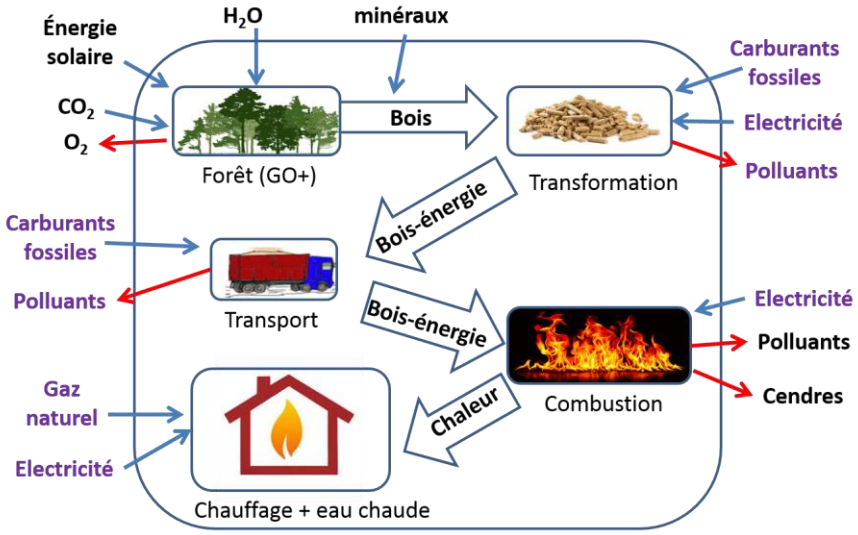


Figure 25: Limites du système étudié, flux entrants et sortants

La Figure 26 présente le schéma directeur de l'ICV et de l'ACV classique. Le logiciel d'ACV GaBi® (version 6.115) est utilisé pour d'une part caractériser les processus amont de production des carburants fossiles et de l'électricité grâce à la base de données EcoInvent (EcoInvent integrated version 3.1), et d'autre part pour calculer les impacts environnementaux à partir des données de l'ICV, selon les méthodes ReCiPe et CML (§ E - 1).

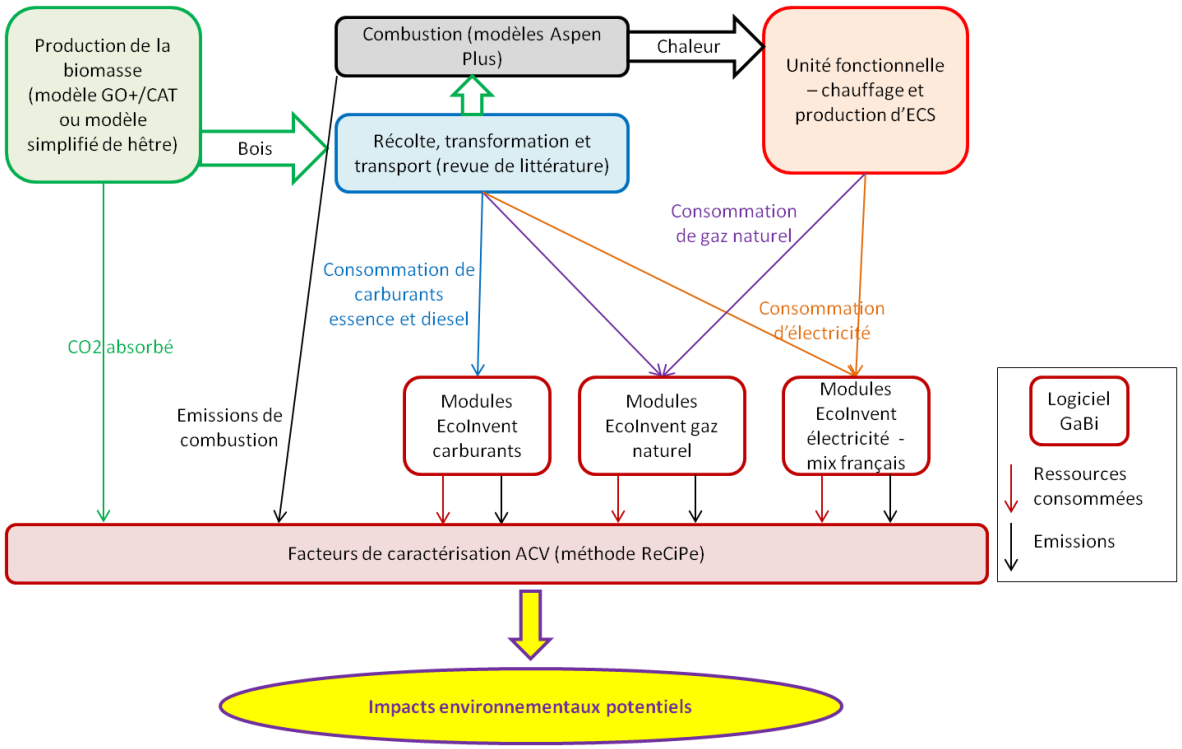


Figure 26: Plan de travail de l'ACV

L'ACV dynamique, concernant seulement l'impact Changement Climatique, est réalisée sur le pin maritime, pour plusieurs scénarios de changement climatique et de sylviculture (§ 0), et sur le hêtre commun, pour plusieurs durées de cycle sylvicole (§ 0). La méthode utilisée est celle mise au point par Levasseur *et al.* (2010) [Levasseur et al., 2010].

A partir de l'Inventaire de Cycle de Vie et de données de la littérature, on calcule également pour chaque scénario de chauffage le coût moyen annualisé pour l'utilisateur. Aux consommations annuelles en carburant bois et fossiles s'ajoutent les frais de maintenance des équipements et l'amortissement de l'investissement initial (§ D).

Enfin, à l'échelle mondiale, la première étape consiste en une revue de littérature sur les coûts de production de la bioénergie (§ F - 1). Ces données localisées, semblables à celles utilisées pour l'analyse micro-économique, sont ensuite intégrées au modèle Nexus Land-Use pour calculer les coûts totaux de production de la bioénergie dans le monde, et tenter de répondre à la question de l'endroit où la production serait faite si la seule considération était celle du coût minimal (§ F - 2).

C. Modélisation de la filière bois-énergie (bilan matière et énergie)

C - 1. Production des combustibles bois

C - 1.1. Le Pin Maritime dans les Landes

C - 1.1.1. Couplage des modèles GO+ et CAT

La Figure 27 présente le principe de modélisation de la production de bois-énergie par les plantations de pin maritime dans les Landes. La croissance et la transformation primaire du pin maritime sont modélisées par le couplage de deux modèles : GO+ pour l'étape de croissance, et CAT pour la transformation.

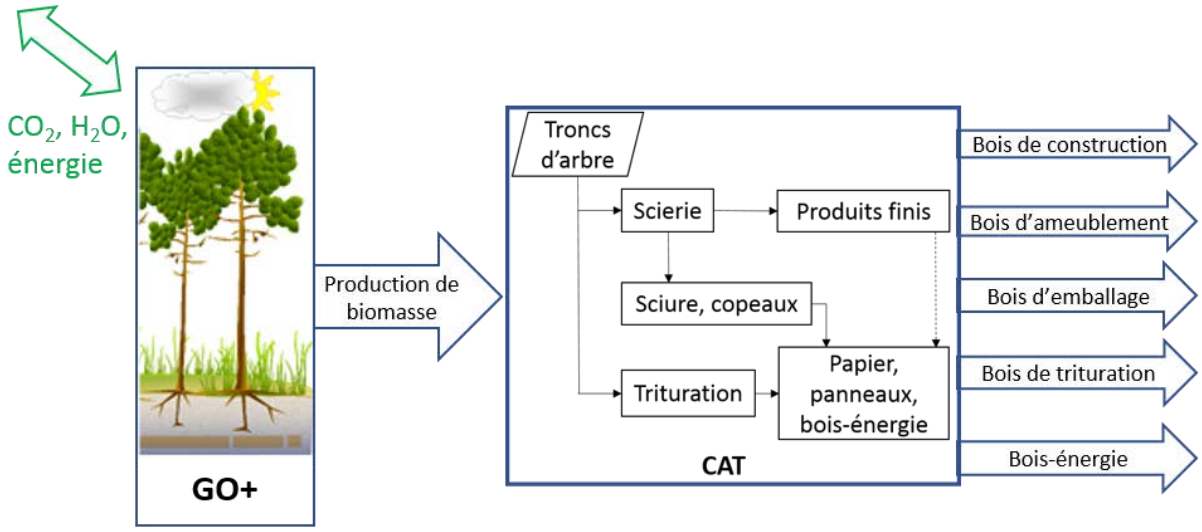


Figure 27: Modélisation de la production de pin maritime par les modèles GO+ et CAT

GO+ a été développé par Denis Loustau et son équipe de l'antenne bordelaise de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) [Loustau et al., 2012]. L'outil CAT est développé par Mathieu Fortin du Laboratoire d'Etude des Ressources FOrêts-Bois (LERFOB) à Nancy [Pichancourt et al., soumis].

Le couplage informatique des deux modèles a été réalisé par M. Fortin et l'équipe de D. Loustau à Bordeaux. Suite à cette collaboration, j'ai exploité ce couplage pour plusieurs scénarios (§ C - 1.1.2).

Le modèle GO+ est codé en langage Python, et CAT en Java. L'interfaçage des modèles s'effectue grâce à la librairie py4j (www.py4j.org). Cette librairie permet à un programme Python d'accéder de manière dynamique à des objets Java dans une machine virtuelle Java. En retour, py4j permet au programme Java d'appeler les objets Python, et ainsi de retransmettre les données calculées au programme GO+. Ainsi les deux modèles peuvent rester synchronisés à chaque pas de simulation.

La Figure 28 présente le fonctionnement des modèles couplés. La simulation commence par la lecture des données de l'Inventaire Forestier National pour connaître l'état actuel du massif. Ensuite, le calcul se déroule à chaque pas de temps suivant les étapes ci-dessous :

- Lecture des données des projections climatiques par point de grille ;
- Prédiction par GO+ de la croissance de la forêt selon la fertilité du sol, la latitude et la classe d'âge de la forêt ;
- Calcul des volumes récoltés et des dimensions moyennes des grumes – calcul par CAT des volumes produits dans chaque catégorie de produit bois – calcul des émissions liées à la transformation.

Une fois les prédictions générées pour chaque pas de temps, chaque classe de fertilité et chaque classe d'âge, les données sont agrégées en fonction de la carte des classes de fertilité et des classes d'âge (issue de l'Inventaire Forestier). Enfin, des cartes régionales sont produites, à un pas de temps annuel. Un exemple de carte est présenté Figure 29.

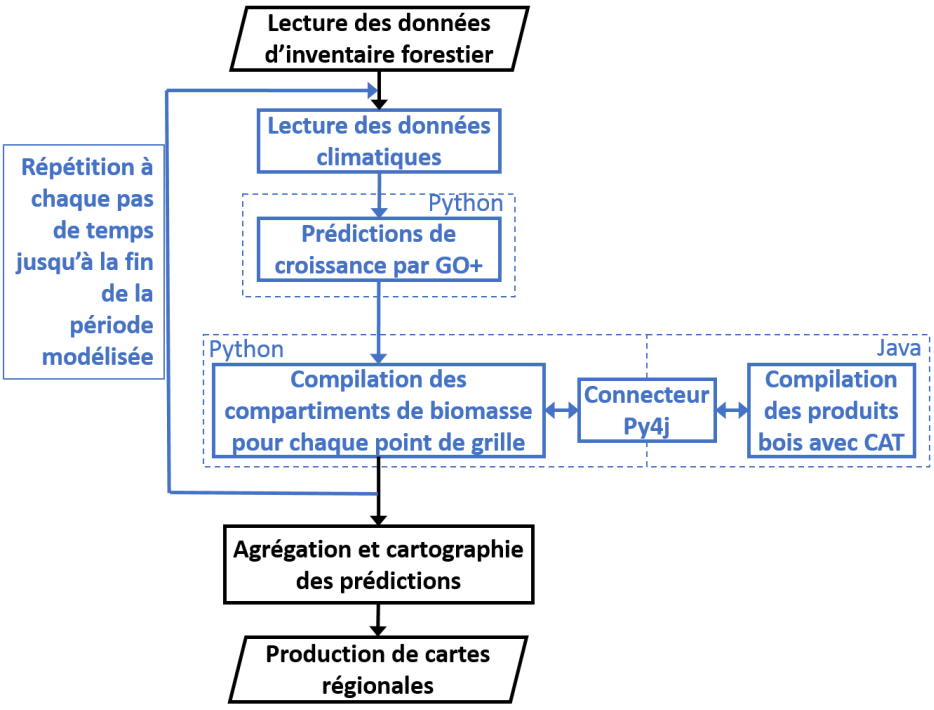


Figure 28: Couplage informatique des modèles GO+ et CAT

C - 1.1.2. Scénarios de changement climatique et itinéraires sylvicoles testés

Trois scénarios de changement climatique et deux scénarios de gestion sylvicole, ou itinéraires techniques, ont été simulés pour le pin des Landes.

Les scénarios climatiques sont trois des quatre scénarios développés dans le cinquième rapport du GIEC [IPCC, 2014], les scénarios RCP (Representative Concentration Pathway). Un scénario RCP permet de modéliser le climat futur. Sur la base de quatre hypothèses différentes concernant la quantité de gaz à effet de serre qui sera émise dans les années à venir (période 2000-2100), chaque scénario RCP donne une variante jugée probable du climat qui résultera du niveau d'émission choisi comme hypothèse de travail. Les quatre scénarios sont nommés d'après la gamme de forçage radiatif ainsi obtenue pour l'année 2100.

Les trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre testés sont les RCP 2.6, 4.5, et 8.5. Le RCP 2.6, très optimiste, prévoit un pic de forçage radiatif à environ 3 $W.m^{-2}$ avant 2100, puis un déclin à 2.6 $W.m^{-2}$, ce qui correspond à un pic de GES d'environ 490 ppm eq-CO_2. Le RCP 4.5 suppose que la concentration en GES va se stabiliser vers 2100 aux alentours de 660 ppm eq-CO_2, pour un forçage radiatif de 4.5 $W.m^{-2}$ environ. Le RCP 8.5, pessimiste, ne comporte pas de stabilisation ; la concentration en GES dépasse les 1370 ppm eq-CO_2 en 2100, et le forçage radiatif est supérieur à 8.5 $W.m^{-2}$.

L'itinéraire technique « extensif » (ITK0) est le modèle suivi par la plupart des exploitants forestiers landais actuellement, basé sur un cycle de renouvellement de la parcelle de 45 ans, avec trois éclaircies (récolte d'une partie seulement des tiges pour favoriser le développement des arbres restants) avant la coupe rase (récolte de tous les arbres). Les variétés plantées appartiennent à la première génération Vigueur et Forme du programme de sélection des vergers à graines landais.

Initié dans les années 1960, ce programme de sélection priorise la vigueur et la rectitude du tronc. La génération VF1 a permis au début des années 1980 de gagner 4 à 5 ans sur les cycles de sylviculture. La génération VF2 a permis de gagner encore deux à trois ans sur le cycle, et la génération VF3 est supposée réduire la durée des cycles à 30 ans au lieu de 40-45 ans sur les populations de départ [France Bois Forêt, 2013].

Les variétés replantées dans l'itinéraire « intensif » (ITK1) appartiennent à cette troisième génération. La durée du cycle est réduite à 30 ans avec une seule éclaircie. La densité de plantation est doublée et les rémanents, ou petits bois, sont récoltés en plus grande quantité (Tableau 12). Dans les deux itinéraires, un débroussaillage du sous-bois est effectué à chaque éclaircie ou coupe rase.

Tableau 12: Caractéristiques des itinéraires de gestion extensif et intensif de la forêt landaise

Itinéraire technique	Préparation du sol	Fertilisation (1 fois par cycle)	Densité de plantation	Date des coupes	Tiges récoltées	Compartiments récoltés
ITK0 (scénario extensif)	100% de la surface labourée sur 30 cm de profondeur	60 kg P_2O_5 /ha	1.250 tiges/ha (variété VF1)	15 ans	25%	Tronc, branchages de plus de 6 cm de diamètre
				25 ans	25%	
				35 ans	25%	
				45 ans	100%	
ITK1 (scénario intensif)	100% de la surface labourée sur 30 cm de profondeur	60 kg P_2O_5 /ha	2.500 tiges/ha (variété VF3)	15 ans	50%	Tronc, écorce, branches intégrales sauf aiguilles
				30 ans	100%	Idem + billot de souche

C - 1.1.3. Résultats

La Figure 29 présente un exemple des cartes régionales issues du modèle : elle montre la production primaire nette de la forêt en sylviculture extensive, sous le scénario climatique RCP2.6. L'aspect cyclique de la production apparaît nettement, notamment dans la zone nord-est : très productive en 2010, elle est ensuite récoltée et reprend un cycle de croissance et d'éclaircies.

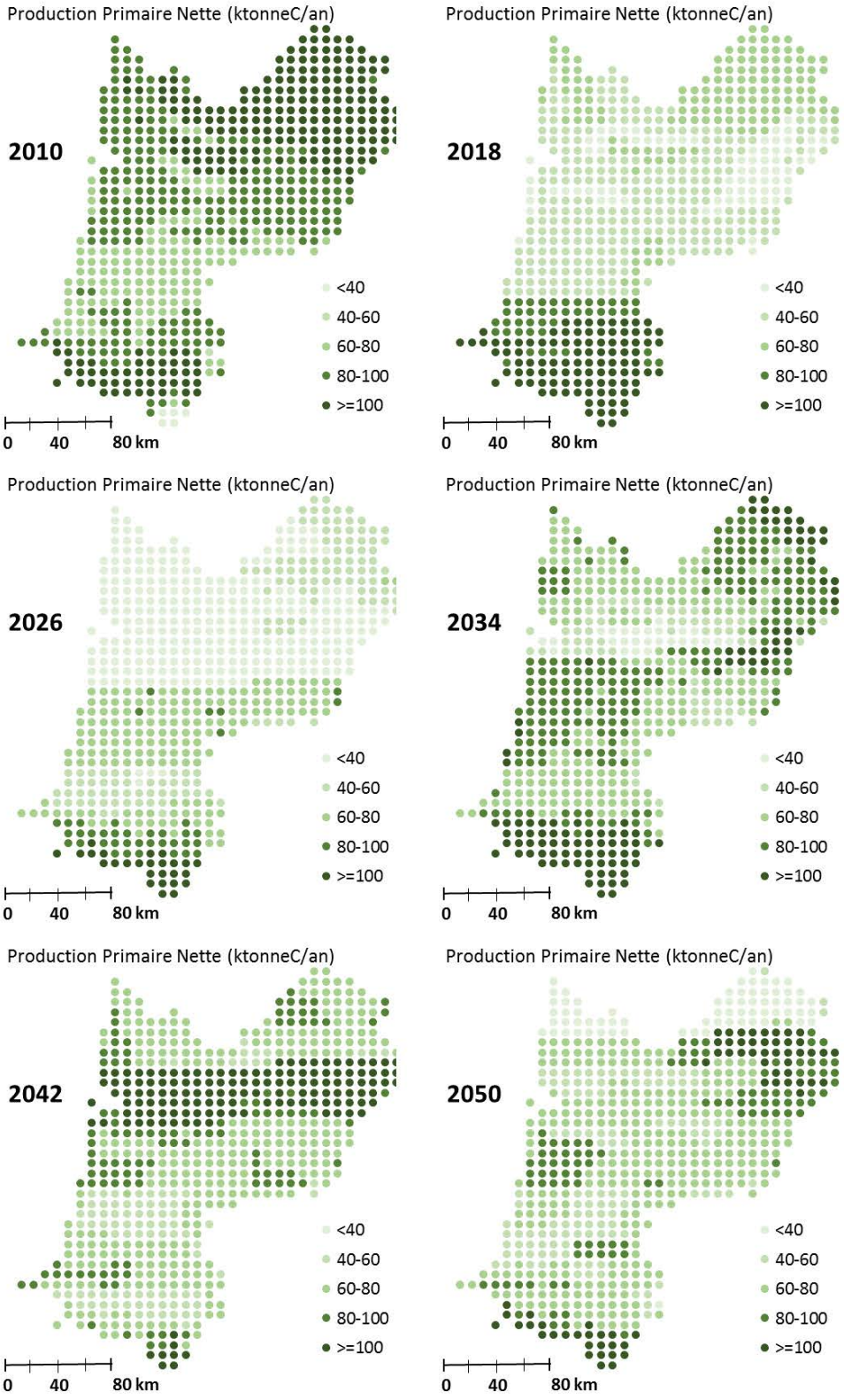


Figure 29: Production Primaire Nette de la forêt landaise selon l'itinéraire sylvicole extensif (scénario climatique RCP2.6)

Sur un siècle, la production primaire nette exprimée en tonnes de carbone varie peu avec l'itinéraire technique et/ou le scénario climatique choisi. L'augmentation du forçage radiatif entraîne une légère hausse, jusqu'à 2 et 3% pour les ITK0 et 1, avec le RCP8.5. A scénario climatique identique, le passage à l'ITK1 entraîne une baisse de production nette de 4.3%, 3.0% et 3.4% respectivement pour les RCP 2.6, 4.5 et 8.5. La quantité totale de biomasse produite dans le massif forestier est donc peu affectée par les différents scénarios. En revanche, l'itinéraire technique a une influence sur la répartition des produits bois issus de la région.

La Figure 30 présente les productions des différents types de produits bois dans chaque scénario. A même itinéraire technique, les différents scénarios climatiques n'ont que très peu d'effet sur la production totale et la répartition des produits bois. Le passage à un système de gestion plus intensif entraîne une augmentation de la production bois totale d'environ 10% ; cette augmentation de production s'effectue au détriment du bois de construction et en faveur des produits à plus courte durée de vie, en particulier les bois d'emballage (palettes etc.). En effet beaucoup moins d'arbres atteignent les dimensions nécessaires pour alimenter la filière construction.

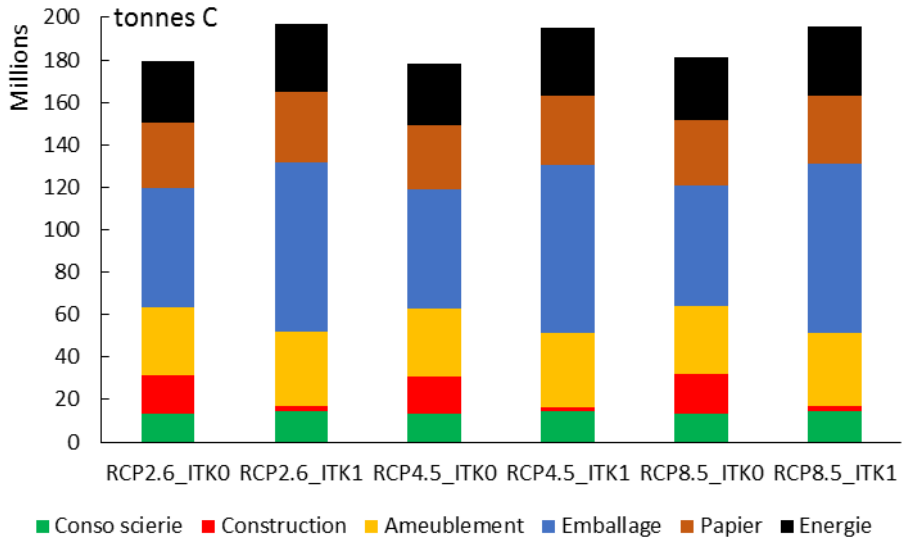


Figure 30: Produits bois issus de la forêt landaise entre 2006 et 2100 selon les différents scénarios climatiques et techniques

La récolte des souches et des rémanents dans l'ITK1 provoque également une baisse du stock de carbone dans le sol. La Figure 31 présente le stock de carbone du sol dans chaque scénario. Elle montre une légère baisse du carbone du sol liée au réchauffement climatique, mais une baisse bien plus importante liée à l'intensification de la gestion sylvicole. Sur 100 ans, les RCP 4.5 et 8.5 entraînent une baisse du carbone du sol de 3% et 7% respectivement par rapport au RCP 2.6, quel que soit le système sylvicole considéré. En revanche, dans tous les scénarios climatiques, le passage à une gestion plus intensive entraîne une perte du stock de carbone de 19% à l'horizon 2100.

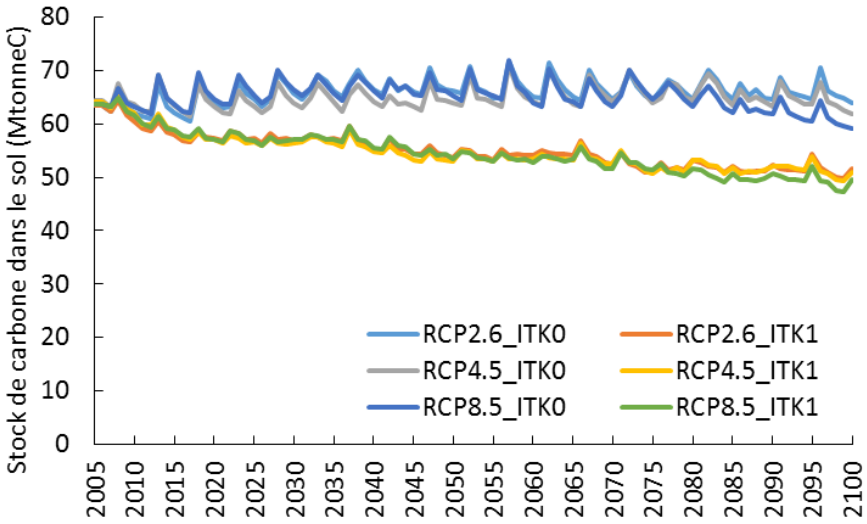


Figure 31: Stock de carbone dans le sol du massif forestier landais sous différents scénarios climatiques et de gestion sylvicole

Cette perte de carbone signifie tout d'abord une baisse de l'effet puits de la forêt, puisque plus de carbone est dégagé dans l'atmosphère. D'autre part elle pourrait impacter la fertilité des sols, ce qui à long terme réduirait la vitesse de croissance des arbres et la production primaire du massif, réduisant encore son potentiel d'absorption de CO_2. L'intensification de la sylviculture comporte donc des risques non négligeables.

Il est à noter que le modèle GO+, s'il peut suivre des scénarios de changement climatique où évoluent la température moyenne, la pluviométrie etc., ne peut pas plus qu'un autre modèle anticiper les tempêtes. Une tempête pourrait être simulée par l'abattage soudain d'une grande partie du massif, mais les résultats n'auraient pas beaucoup de sens puisque la date, la force de la tempête et la zone affectée seraient totalement prédéterminées, et donc auraient peu de chances de refléter un cas réel.

Les scénarios projetés supposent aussi qu'aucun changement radical (politique, économique, social) ne vient affecter les décisions des sylviculteurs sur de très longues périodes.

C - 1.2. Le Hêtre Commun en Lorraine

C - 1.2.1. Croissance de la forêt

L'aspect dynamique de la croissance du hêtre est simplifié par rapport au cas du pin, car le calage du modèle GO+ sur le hêtre est en cours de finalisation. Nous étudierons l'impact d'un raccourcissement du cycle sylvicole sur un bosquet homogène. La Figure 32 présente le profil de croissance d'un hêtre sur un sol de fertilité moyenne entre 0 et 140 ans (profil adapté de [Bastien, 2000; Bontemps et al., 2007; Tran-Ha et al., 2007]). La biomasse produite n'est pas récoltable à 100%, une partie du houppier et des racines est systématiquement laissée sur place. Le taux d'absorption de CO_2 va croissant avec la masse de l'arbre, et la sénescence (ralentissement de la croissance) ne s'observe pas à cette échelle temporelle.

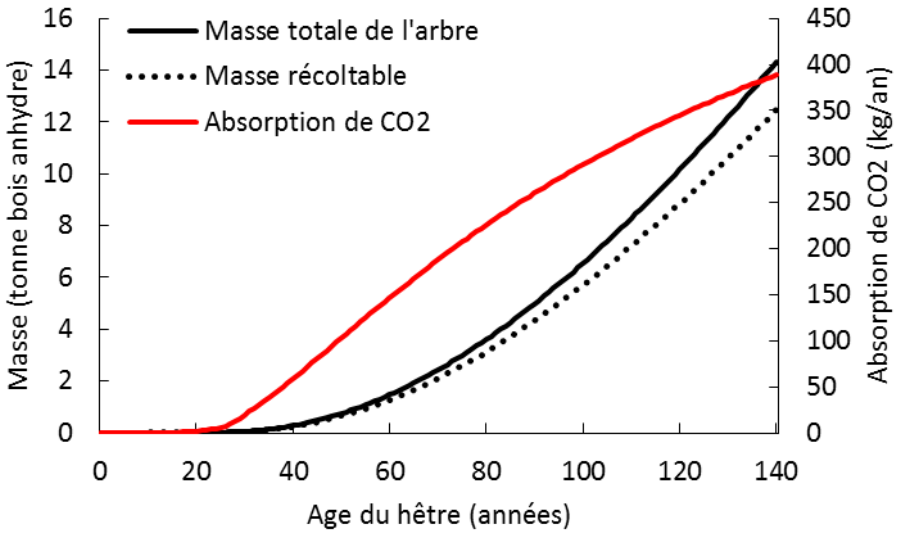


Figure 32: Croissance d'un hêtre et absorption de CO_2 au cours du temps

La sylviculture traditionnelle du hêtre est fondée sur un cycle de 140 ans, visant à produire des bois de charpente. Cependant le prix de marché du hêtre est très bas depuis plusieurs années [Observatoire économique de France Bois Forêt, 2014]. Ceci conduit les sylviculteurs à augmenter leur production de bois de trituration et de chauffage, et à raccourcir le cycle de récolte du hêtre à 100 ans. Le cycle pourrait être raccourci jusqu'à 60 ans, pour une production presque exclusivement composée de bois de trituration ou de bois énergie. Cet itinéraire extrêmement raccourci n'est pas mis en place à l'heure actuelle ; il est ajouté ici pour la comparaison.

C - 1.2.2. Récolte et transformation du bois

Le bois est transporté sur une distance variable selon sa forme. Le bois bûche reste majoritairement une ressource locale : on suppose une distance de transport de 25 km. Les granulés doivent passer par la scierie : on suppose une distance de transport de 50 km. Enfin pour les plaquettes forestières, trois scénarios de transport sont considérés pour étudier l'effet de ce paramètre sur leur bilan environnemental : 50, 100, et 150 km.

C - 2. Modélisation de la combustion du bois

C - 2.1. Unité fonctionnelle et scénarios étudiés

L'unité fonctionnelle retenue pour notre ACV est le chauffage et la production d'eau chaude sur une année, pour un foyer de quatre personnes occupant une maison de 100 m^2 de surface. Le bâtiment est supposé respecter la Régulation Thermique 2005 [Premier ministre et al., 2006]. Selon les caractéristiques thermiques du bâtiment, dans la zone climatique de Lorraine, les besoins de chauffage sont de 6.500 kWh, ou 23,4 GJ, par an. La production d'eau chaude pour quatre personnes demande 2.500 kWh, ou 9 GJ, supplémentaires. Il est à noter que si la demande en eau chaude est à peu près constante dans l'année, les besoins en chauffage varient fortement selon la saison (Figure 33).

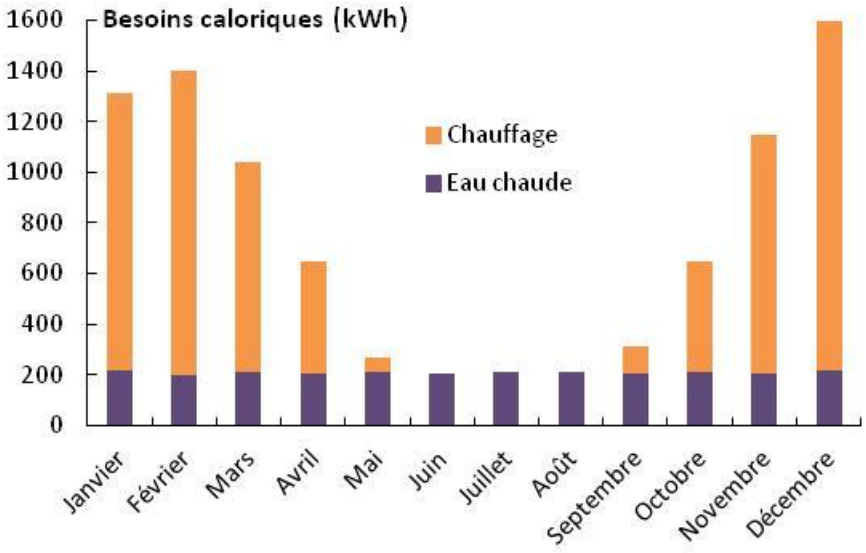


Figure 33: Besoins mensuels en chauffage et eau chaude pour un foyer de 4 personnes occupant une maison RT2005 de 100m^2 en Lorraine

Les scénarios étudiés sont les suivants :

(S1) Système tout-électrique (radiateurs et chauffe-eau)

(S2) Système électrique avec couverture partielle du chauffage par un poêle à bûches

(S3) Système électrique avec couverture partielle du chauffage par un poêle à granulés de bois

(S4) Chaudière individuelle à bûches

(S5) Chaudière individuelle à granulés de bois

(S6) Chaudière individuelle au gaz naturel

(S7) Chaudière individuelle au fioul domestique

(S8) Alimentation par réseau de chaleur à plaquettes forestières

(S9) Alimentation par réseau de chaleur au gaz naturel

Les rendements thermiques des technologies de combustion de bois sont calculés lors de la modélisation du procédé (§ C - 2.2). Les autres particularités techniques retenues pour chaque scénario sont les suivantes :

(S1) : Le rendement de la conversion de l'électricité en chaleur, par effet Joule, est de 100%.

(S2) et (S3) : Les poêles à bûches ou granulés présentent un seuil de fonctionnement en-dessous duquel ils sont très peu efficaces et produisent davantage de polluants. Il est donc nécessaire de conserver des radiateurs électriques pour couvrir les périodes de froid modéré ainsi que pour ajouter à la puissance du poêle en période de froid intense. Il est considéré que, sur l'année, les besoins de chauffage sont couverts à 50% par le poêle à bûches et à 70% par le poêle à granulés, doté d'une plage de fonctionnement plus flexible. L'eau chaude reste produite à 100% par le ballon électrique.

(S4) et (S5) : Les chaudières à bûches et à granulés peuvent fonctionner tout au long de l'année pour fournir l'eau chaude et le chauffage.

(S6) : La chaudière individuelle à gaz naturel est une chaudière à condensation, présentant un rendement thermique de 105% sur le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du gaz. Le PCI du gaz est de 38 MJ / m^3.

(S7) : La chaudière à fioul a un rendement thermique de 85% sur PCI. Le PCI du fioul domestique est de 36 MJ / m^3.

(S8) : Les pertes thermiques sur le réseau de chaleur sont fixées à 10%. La chaufferie à bois est complétée par une chaudière à gaz pour les pics de demande ou les périodes de maintenance de la chaudière à bois. L'efficacité sur PCI de cette chaudière est de 95%. Le réseau est dimensionné

pour fournir un total de 9.5 GWh de chaleur par an ; les consommations et coûts de construction sont ramenés ensuite aux 9 MWh consommés par le ménage. Les taux de couverture bois et gaz sont fixés à 90% et 10%, respectivement. Le PCI du gaz est de 38 MJ / m^3.

(S9) : Les pertes thermiques sur le réseau de chaleur sont fixées à 10%. L'efficacité sur PCI la chaudière est de 95%. Le PCI du gaz est de 38 MJ / m^3.

En-dehors du poêle à bûches, chaque système consomme de l'électricité pour fonctionner. Cette consommation est variable suivant la technologie. Elle est estimée à partir de données techniques obtenues auprès des constructeurs ou distributeurs d'un échantillon de modèles de chaudières à bûches, de chaudières à granulés, et de poêles à granulés.

C - 2.2. Combustion du bois

C - 2.2.1. Modèle de combustion Aspen Plus®

La combustion du bois est modélisée sous Aspen Plus®, suivant la méthode mise au point par Jessica François (§ A - 5.2) [François, 2014]. Un modèle de procédé Aspen Plus® est couplé avec une feuille de calcul en langage FORTRAN ; cette dernière calcule les quantités de polluants produites pour que la concentration des fumées en sortie de combustion corresponde aux données expérimentales disponibles (§ 0); le logiciel de procédés calcule les enthalpies de réaction et donc l'énergie dégagée. Cinq technologies différentes sont modélisées :

- Poêle à bûches (alimentation manuelle)
- Poêle à granulés (alimentation automatisée possible)
- Chaudière à bûches (alimentation manuelle)
- Chaudière à granulés (alimentation automatisée ; programmable)
- Chaufferie de quartier à plaquettes forestières

Les différentes technologies sont modélisées sur le même principe, présenté en Figure 34 :

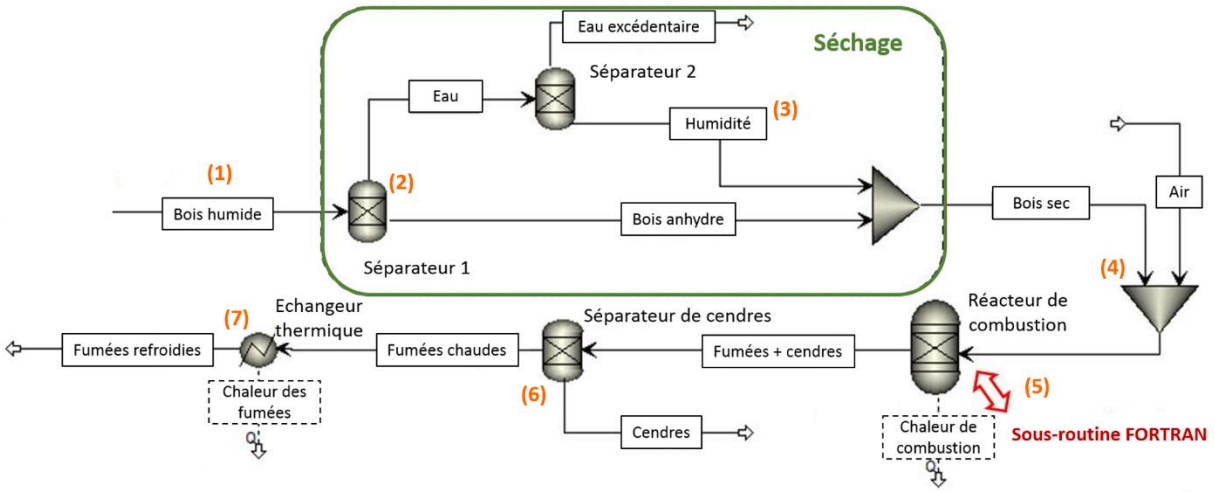


Figure 34: Modèle de combustion du bois sous Aspen Plus®

1) Le bois vert rentre dans le système ; sa teneur en eau est de 70% sur masse anhydre ;
2) L'eau est séparée du bois anhydre ;
3) L'humidité caractéristique à chaque combustible est réintégrée au flux de bois anhydre : 40% pour les plaquettes forestières, 25% pour les bûches, 10% pour les granulés ;
4) Le bois, l'humidité et l'air entrent dans le réacteur de combustion ; les facteurs d'air retenus sont de 2,5 pour les poêles et chaudières individuelles, et de 1,25 pour la chaudière à plaquettes automatisée [Rogaume, 2014]. Le facteur d'air des technologies à granulés pourrait sans doute être abaissé, en raison du meilleur contrôle possible de l'apport d'air par rapport aux technologies à bûches. Cependant, à cause de la relative nouveauté de ces équipements, aucune source n'a pu être trouvée dans la littérature décrivant précisément ces aspects. Aussi le facteur d'air a été fixé de manière identique pour le poêle et pour la chaudière à bûches.
5) La composition des fumées est calculée à partir des données expérimentales (§ 0) ;
6) Les cendres sont séparées des fumées chaudes ;
7) Les fumées refroidissent jusqu'à atteindre la température d'échappement caractéristique de l'équipement modélisé : 330°C pour le poêle à bûches, 125°C pour le poêle à granulés, 150°C pour la chaudière à bûches, 160°C pour la chaudière à granulés, 110°C pour la chaudière industrielle à plaquettes.

Le détail de chaque étape modélisée sous Aspen Plus® est précisé en Annexe III.

C - 2.2.2. Calcul des émissions

La méthode de calcul des émissions de combustion est présentée Figure 35. Le module de combustion commence par calculer les quantités de polluants (CO, NOx, Composés Organiques Volatils - COV) produites d'après les données expérimentales issues d'essais à échelle réelle ([Rogaume, 2008, 2010], Tableau 13). Les COV comprennent du méthane (CH_4), des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et du benzène (C_6H_6).

Tableau 13: Polluants issus de la combustion du bois pour différentes technologies, d'après des essais à échelle réelle [Rogaume, 2008, 2010]

Technologie de combustion	Poêle à bûches	Poêle à granulés	Chaudière à bûches	Chaudière à granulés	Réseau de chauffage aux plaquettes de bois
Température de sortie des fumées (°C)	330	125	150	160	110
Concentration des polluants corrigée à	13% O_2		10% O_2		11% O_2
Monoxyde de carbone (CO), $mmol.Nm^{-3}$	361,61	22,32	133,93	3,18	8,625
Oxydes d'azote (NO_x), $mmol.Nm^{-3}$	1,64	3,11	4,19	4,39	3,3
Particules, $mg.Nm^{-3}$	42,04	48,16	7,66	99,44	10,0
Composés Organiques Volatils (COV) – total, $mmol.Nm^{-3}$	48,13	1,72	6,06	$2,25 \cdot 10^{-2}$	$9,07 \cdot 10^{-2}$
Méthane (CH_4), $mmol.Nm^{-3}$	5,81	$2,12 \cdot 10^{-1}$	1,81	$8,13 \cdot 10^{-3}$	$2,94 \cdot 10^{-2}$
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), $mmol.Nm^{-3}$	$7,32 \cdot 10^{-2}$	$3,65 \cdot 10^{-3}$	$7,35 \cdot 10^{-3}$	$3,47 \cdot 10^{-5}$	$3,75 \cdot 10^{-2}$

Les données expérimentales distinguent 17 composés parmi la famille des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques. 95% de la masse totale de HAP sont représentés par seulement cinq composés, et les autres représentent chacun moins de 0.9% de la masse totale. Aussi, seuls ces cinq principaux HAP ont été retenus : fluoranthène ($C_{16}H_{10}$), pyrène ($C_{16}H_{10}$), naphtalène ($C1_0H_8$), 2-méthylnaphtalène ($C_{11}H_{10}$), et phénantrène ($C_{14}H_{10}$). Le Tableau 14 fait correspondre à chaque HAP mineur son représentant parmi les cinq retenus.

Tableau 14: HAPs représentatifs

HAP	HAP représentatif
Fluoranthène	Fluoranthène
Pyrène	Pyrène
Benzo(b)fluoranthène Benzo(k)fluoranthène Benzo(a)pyrène Indéno(1,2,3,cd)pyrène Benzo(a)anthracène Dibenzo(a,h)anthracène Benzo(ghi)pérylène Chrysène	Fluoranthène et Pyrène
Naphtalène Acénaphtène Fluorène	Naphtalène
2-méthyl naphtalène	2-méthyl naphtalène
Phénanthrène Anthracène 2-méthyl fluoranthène	Phénantrène

La correspondance est basée sur la proximité entre la formule chimique globale du composé de départ et du représentant, en particulier le rapport C/H. Fluoranthène et pyrène ayant la même formule chimique, les HAP mineurs de formule proche sont répartis entre ces deux représentants en conservant le rapport molaire des émissions réelles de fluoranthène et pyrène. Le reste des COV, en-dehors du méthane et des HAP, est modélisé comme du benzène (C_6H_6).

Après le calcul des quantités de polluants, le bilan atomique est bouclé par la production de CO_2 et d'eau (H_2O). La stoechiométrie de la réaction finale suit une équation de la forme suivante, avec toutes les espèces modélisées sous Aspen Plus® :

$$\begin{aligned} C_aH_bO_cN_dS_eCl_f + \nu_{O2i}O_2 + \nu_{N2i}N_2 \rightarrow\ & \nu_{CO2}CO_2 + \nu_{H2O}H_2O + \nu_{CO}CO + \nu_C C + \nu_{CH4}CH_4 \\ & + \nu_{C10H8}C_{10}H_8 + \nu_{C12H8}C_{11}H_{10} + \nu_{C14H10}C_{14}H_{10} \\ & + \nu_{C16H10f}C_{14}H_{16f} + \nu_{C16H10p}C_{16}H_{10p} + \nu_{C6H6}C_6H_6 + \nu_{C2H2}C_2H_2 \\ & + \nu_{SO2}SO_2 + \nu_{HCl}HCl + \nu_{NO}NO + \nu_{NO2}NO_2 \\ & + \nu_{ASHN}ASH_N + \nu_{ASHS}ASH_S + \nu_{N2}N_2 \end{aligned} \quad \text{(E4)}$$

Le calcul est réitéré jusqu'à ce que la différence relative entre deux itérations sur le taux d'O_2 en sortie soit inférieure à $\varepsilon=10^{-4}$ (Figure 35). Cette valeur d'erreur est retenue comme un bon compromis entre précision et temps de calcul. Le taux d'oxygène de référence des concentrations en polluants ($O_2\%_0$) varie selon la technologie modélisée (Tableau 13).

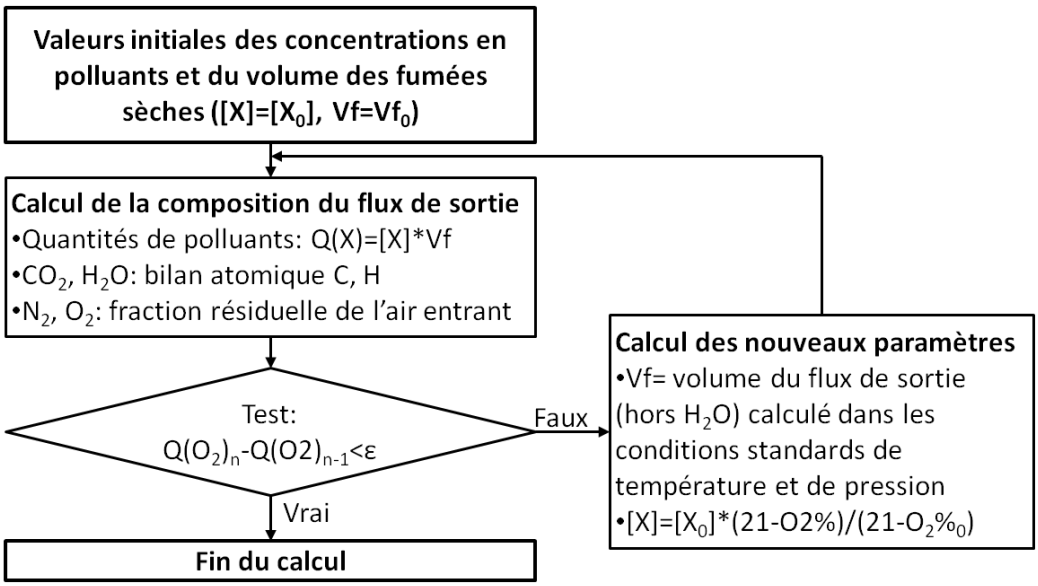


Figure 35: Calcul des émissions de combustion du bois par le modèle Aspen/FORTRAN

Les différentes technologies de combustion sont modélisées avec des concentrations en polluants en sortie prédéterminées ; il n'y a pas de véritable modèle réactionnel. Ceci limite l'étude des facteurs pouvant influencer la qualité de la combustion. Par exemple, l'augmentation de l'humidité du combustible dans le modèle entraîne une baisse du rendement énergétique mais n'a pas d'autre influence sur la quantité de polluants émis. De même, la variation de composition entre les bois de différentes espèces a un impact négligeable sur les émissions totales.

Néanmoins, cette méthode de modélisation permet de s'assurer d'un bon bouclage des bilans atomiques avec des émissions de polluants réalistes car calées à partir de données à l'échelle réelle (sur des appareils commerciaux). Il semblerait très difficile de développer un modèle plus méthodologique incluant les mécanismes de formation des polluants à partir des connaissances actuelles. En effet, la combustion du bois est un mécanisme complexe et les produits et polluants dépendent de la composition du bois mais également de conditions complexes du réacteur de combustion (hydrodynamique, transferts de masse et de chaleur, distribution des temps de séjour et gradients de températures dans la chambre de combustion, etc.).

C - 2.3. Résultats de la modélisation de la combustion du bois

Le Tableau 15 et le Tableau 16 présentent les entrants et sortants du système pour chaque technologie, pour un kg de bois anhydre en entrée. En entrée, les seules variations proviennent de l'humidité du combustible et du facteur d'air. Les résultats intéressants pour l'ACV sont l'énergie récupérée et les émissions en sortie.

Tableau 15: ICV de la phase de combustion du bois – entrants

Entrants de la combustion (kg / $kg_{bois\ anhydre}$)		Poêle à bûches (S2)	Chaudière à bûches (S4)	Poêle à granules (S3)	Chaudière à granules (S5)	Réseau de chaleur à plaquettes de bois
Bois anhydre		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Humidité	H_2O	$2,5 \cdot 10^{-01}$	$2,5 \cdot 10^{-01}$	$1,0 \cdot 10^{-01}$	$1,0 \cdot 10^{-01}$	$4,0 \cdot 10^{-01}$
Air	O_2	3,30	3,30	3,29	3,29	1,46
	N_2	10,9	10,9	10,8	10,8	4,85
Total		15,4	15,4	15,2	15,2	7,71

(1) Le taux d'humidité diffère selon les combustibles

Les rendements thermiques sur PCI calculés par les modèles Aspen Plus® sont de 67% pour le poêle à bûches, 88% pour la chaudière à bûches, 90% pour le poêle à granulés, 87% pour la chaudière à granulés et 78% pour la chaudière collective du réseau de chaleur. Ces résultats sont légèrement pessimistes pour le poêle à bûches et optimistes pour le poêle à granulés ; les valeurs relevées dans la littérature sont respectivement de 72-75% et au maximum 85% [Caserini et al., 2010; Ozgen et al., 2014; Rogaume, 2005a]. Les différences de rendement proviennent à la fois de l'écart de température des fumées (ou qualité de l'échange thermique) et de la qualité de combustion.

La consommation d'azote est virtuellement identique pour toutes les technologies. En effet l'azote est majoritairement inerte ; une très faible quantité est oxydée pour produire des NOx, mais l'immense majorité traverse la chambre de combustion et ressort sans transformation.

En revanche, il y a une nette différence dans la consommation d'oxygène entre le poêle à bûches et les autres technologies. 65% de l'oxygène entrant ressort, contre 60% pour le poêle à granulés et les chaudières à bûches et à granulés, qui ont pourtant le même facteur d'air. Ceci témoigne de la mauvaise qualité de la combustion du bois dans le poêle à bûches. Un autre élément probant est la forte production de Composés Organiques Volatils – jusqu'à 2,2 g par kg de fumées.

La production de cendres est rigoureusement identique pour toutes les technologies, car elles sont définies comme 0,96% de la masse anhydre du bois. En revanche, la formation de particules varie, avec notamment de fortes émissions de la chaufferie collective à plaquettes de bois. Cependant il faut noter que les émissions rapportées ici concernent les fumées brutes en sortie de chaudière. Les installations industrielles sont équipées de filtres. Pour l'ICV final, on considère que la chaufferie bois est équipée d'un filtre à manche d'efficacité 97%.

La méthode de modélisation utilisée est certes plus précise que d'utiliser seulement des données de la littérature, mais elle ne permet tout de même pas de comparer, par exemple, plusieurs essences de bois, ou de prendre en compte l'influence de l'humidité sur les réactions de combustion. En effet, il n'y a pas de véritable modèle réactionnel, mais seulement les concentrations en polluants des fumées. Une fois ces concentrations calculées, l'ajustement se fait sur la production de CO_2 et d'eau. La variation du rapport C/H entre deux essences de bois est assez faible, aussi la différence de production de CO_2 et d'H_2O serait presque nulle. De même, alors que l'humidité devrait influer sur les polluants produits, elle n'est ici prise en compte que pour le calcul de l'énergie récupérée au niveau des échangeurs de chaleur.

Tableau 16: ICV de la phase de combustion du bois – sortants

		Poêle à bûches	Chaudière à bûches	Poêle à granulés	Chaudière à granulés	Réseau de chaleur à plaquettes de bois
Energie thermique récupérée, par kg de bois anhydre		2,58 kWh (9,30 MJ)	3,98 kWh (14,34 MJ)	4,29 kWh (15,45 MJ)	4,16 kWh (14,99 MJ)	3,90 kWh (14,03 MJ)
Rendement thermique sur PCI du bois		67%	88%	90%	87%	78%
Produits de la combustion (kg / $kg_{bois\ anhydre}$)						
Air résiduel	O_2	2,15	2,01	1,99	1,99	$2,49 \cdot 10^{-01}$
	N_2	10,8	10,8	10,8	10,8	4,85
Produits majeurs de la combustion	CO_2	1,50	1,72	1,76	1,77	1,66
	H_2O, y compris humidité	$7,62 \cdot 10^{-01}$ $2,5 \cdot 10^{-01}$	$7,85 \cdot 10^{-01}$ $2,5 \cdot 10^{-01}$	$6,36 \cdot 10^{-01}$ $1,0 \cdot 10^{-01}$	$6,37 \cdot 10^{-01}$ $1,0 \cdot 10^{-01}$	$9,43 \cdot 10^{-01}$ $4,0 \cdot 10^{-01}$
HAP	Naphtalène	$7,15 \cdot 10^{-05}$	$5,79 \cdot 10^{-06}$	$3,49 \cdot 10^{-06}$	$2,42 \cdot 10^{-08}$	$4,78 \cdot 10^{-04}$
	Phénantrène	$1,40 \cdot 10^{-05}$	$1,13 \cdot 10^{-06}$	$9,06 \cdot 10^{-07}$	$6,29 \cdot 10^{-9}$	$4,78 \cdot 10^{-04}$
	Pyrène	$6,80 \cdot 10^{-06}$	$5,50 \cdot 10^{-07}$	$6,89 \cdot 10^{-07}$	$4,79 \cdot 10^{-9}$	$4,78 \cdot 10^{-04}$
	Fluoranthène	$7,79 \cdot 10^{-06}$	$6,30 \cdot 10^{-07}$	$7,03 \cdot 10^{-07}$	$4,90 \cdot 10^{-9}$	$4,78 \cdot 10^{-04}$
	2-méthyl-naphtalène	$4,39 \cdot 10^{-06}$	$3,55 \cdot 10^{-07}$	$2,94 \cdot 10^{-07}$	$2,04 \cdot 10^{-9}$	$4,78 \cdot 10^{-04}$
Autres COV	CH_4	$9,42 \cdot 10^{-04}$	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$3,84 \cdot 10^{-05}$	$1,08 \cdot 10^{-06}$	$2,87 \cdot 10^{-04}$
	Benzène	$3,33 \cdot 10^{-02}$	$2,70 \cdot 10^{-03}$	$1,33 \cdot 10^{-03}$	$9,25 \cdot 10^{-06}$	$9,09 \cdot 10^{-04}$
Autres composés volatiles	CO	$1,02 \cdot 10^{-01}$	$3,05 \cdot 10^{-02}$	$7,07 \cdot 10^{-03}$	$7,35 \cdot 10^{-04}$	$1,20 \cdot 10^{-02}$
	NO_x	$7,60 \cdot 10^{-04}$	$1,57 \cdot 10^{-03}$	$1,62 \cdot 10^{-03}$	$1,67 \cdot 10^{-03}$	$1,38 \cdot 10^{-03}$
	HCL	$5,14 \cdot 10^{-05}$	$5,14 \cdot 10^{-05}$	$5,14 \cdot 10^{-05}$	$5,14 \cdot 10^{-05}$	$5,14 \cdot 10^{-05}$
	SO_2	$1,59 \cdot 10^{-03}$	$1,59 \cdot 10^{-03}$	$1,59 \cdot 10^{-03}$	$1,59 \cdot 10^{-03}$	$3,40 \cdot 10^{-04}$
	Furanes					$2,39 \cdot 10^{-08}$
Solides	Particules	$5,13 \cdot 10^{-03}$	$7,51 \cdot 10^{-04}$	$6,57 \cdot 10^{-03}$	$9,91 \cdot 10^{-03}$	$2,40 \cdot 10^{-02}$
	Cendres	$9,60 \cdot 10^{-03}$	$9,60 \cdot 10^{-03}$	$9,60 \cdot 10^{-03}$	$9,60 \cdot 10^{-03}$	$9,60 \cdot 10^{-03}$
Total (masse des fumées)		15,4	15,4	15,2	15,2	7,71

C - 3. Résultats d'ICV sur l'ensemble de la filière

Les données d'inventaire pour les phases de récolte, transformation et transport du bois sont obtenues à partir de la quantité de bois consommé et des facteurs issus de la littérature (Tableau 3, § A - 3.2, page 26).

Le Tableau 17 présente l'ICV entrant pour tous les scénarios. La consommation de bois des différents scénarios varie avec 1) la part des besoins couverte par une autre énergie (électricité ou gaz naturel), et 2) le rendement thermique des équipements. Ainsi le scénario poêle à bûches (S2) consomme plus de bois que le scénario poêle à granulés (S3) malgré une part plus importante de l'électricité dans la couverture des besoins, parce que le rendement du poêle à bûches est beaucoup plus faible que celui du poêle à granulés. Le poêle à bûches produit également beaucoup plus de polluants, notamment du CO et des COVs. Le scénario poêle à bûches (S2) émet 20 fois plus de CO que le scénario poêle à granulés (S3), la chaudière à bûches (S4) 35 fois plus que la chaudière à granulés (S5).

Les consommations liées à la production des carburants fossiles et de l'électricité sont déterminées en arrière-plan par des fiches choisies dans la base de données EcoInvent (Tableau 19).

Le Tableau 18 présente les émissions de la phase de combustion du bois pour les différents scénarios de chauffage. Les émissions des autres phases sont déterminées via les fiches EcoInvent (Tableau 19). En-dehors des NOx, le poêle à bûches est le scénario qui produit le plus de polluants, alors même qu'il consomme moins de bois que les scénarios à chaudière en raison de son faible taux de couverture bois. Son taux d'émission de polluants pour chaque kg de bois consommé est bien plus élevé que pour les autres technologies (Tableau 16) ; de plus, son faible rendement énergétique entraîne une plus haute production de polluants par unité d'énergie livrée au consommateur. La chaudière à granulés émet particulièrement peu de Composés Organiques Volatils. L'excellent rendement énergétique de la chaudière gaz à condensation lui permet de consommer 20% de gaz en moins par rapport au réseau de chaleur à gaz.

Tableau 17: ICV des différents scénarios de chauffage (UF: chauffage et production d'eau chaude sur un an - maison RT2005 de 100 m^2 en Lorraine, 4 habitants): entrants

Etape	Poste	Unité	(S1) Tout-électrique	(S2) Poêle à bûches	(S3) Poêle à granulés	(S4) Chaudière à bûches	(S5) Chaudière à granulés	(S6) Chaudière à gaz	(S7) Chaudière à fioul	(S8) Réseau de chaleur à plaquettes			(S9) Réseau de chaleur à gaz
Croissance forêt	Absorption CO_2	tonne	-	2,23	1,88	4,01	3,83	-	-	4,73			-
Récolte	Diesel	L	-	31,47	23,33	56,48	47,55	-	-	74,59			-
Broyage	Diesel		-	-	-	-	-	-	-	27,60			-
Pelletisation	Electricité	MJ	-	-	748,89	-	1481,33	-	-	-			-
	Gaz naturel	MJ	-	-	4299,75	-	8505,00	-	-	-			-
Transport du bois	Diesel (distance de transport)	L (km)	-	5,24 (25)	7,78 (50)	9,41 (25)	15,85 (50)	-	-	12,43 (25)	24,86 (50)	60,42 (150)	-
Chauffage – carburants fossiles	Electricité (mix France)	GJ	32,4	20,70	16,74	1,44	2,16	0,11	0,11	0,06			0,72
	Gaz naturel	m^3	-	-	-	-	-	812,11	-	100,26			1.003,16
	Fioul domestique	m^3	-					-	1.058,89				-
Chauffage - bois	Bois anhydre	tonne	-	1,26	1,06	2,26	2,16	-	-	2,66			-
	Humidité	% sur base anhydre	-	25	10	25	10	-	-	40			-
	Bois humide	tonne	-	1,57	1,17	2,82	2,38	-	-	3,73			-
	PCI	$MJ \cdot kg_{humide}^{-1}$	-	13,0	15,7	13,0	15,7	-	-	12,5			-
Transport des cendres	Diesel	L	-	-	-	-	-	-	-	0,34			-

Tableau 18: Emissions de la phase de combustion du bois pour les différents scénarios de chauffage (UF: chauffage et production d'eau chaude sur un an - maison RT2005 de 100 m² en Lorraine, 4 habitants)

Etape	Espèces	Unité	(S1) Tout-électrique	(S2) Poêle à bûches	(S3) Poêle à granulés	(S4) Chaudière à bûches	(S5) Chaudière à granulés	(S6) Chaudière à gaz	(S7) Chaudière à fioul	(S8) Réseau de chaleur à plaquettes	(S9) Réseau de chaleur à gaz
Combustion du bois	CO_2	tonne	-	1,88	1,86	3,88	3,82	-	-	4,42	-
	CO	kg	-	128,78	7,50	68,94	1,59	-	-	31,86	-
	NO_x		-	0,96	1,71	3,55	3,61	-	-	3,67	-
	CH_4		-	1,19	0,04	0,53	0,002	-	-	0,76	-
	HAP		-	0,13	0,01	0,02	0,0001	-	-	6,37	-
	Autres COVNM		-	41,95	1,41	6,09	0,02	-	-	2,42	-
	Particules		-	6,46	0,70	1,70	2,14	-	-	1,92	-
	Cendres		-	12,08	10,18	21,69	20,75	-	-	25,49	-

La base de données EcoInvent est utilisée pour caractériser les consommations et émissions des carburants fossiles et de l'électricité, tant au niveau de la chaîne de production amont qu'au niveau de l'utilisation finale. La base de données propose des ICV par flux (par exemple électricité, mix français) et par procédé (par exemple production de chaleur à partir de gaz naturel, à échelle industrielle). Les ICV sont associés à une zone géographique, qui peut aller du pays (par ex. France, Suisse), à la grande région (par ex. Europe, Amérique du Nord), à l'échelle mondiale. Plus la région est vaste, plus les données disponibles sont imprécises. Aussi les fiches utilisées (Tableau 19) ont été le plus possible des fiches correspondant au territoire européen, voire français ou suisse. Des fiches EcoInvent sont disponibles pour toutes les étapes des scénarios, sauf pour la récolte du bois à la tronçonneuse. L'approximation retenue pour cette opération est la production d'essence, dans les quantités relevées dans la littérature, et la combustion de cette essence par un moteur de mobylette. Pour éviter de comptabiliser deux fois les impacts liés à la production de l'essence, c'est la version « procédé unitaire » de la fiche « utilisation d'une mobylette » qui est retenue, et non la version « procédé agrégé », qui prend en compte l'ensemble de la chaîne amont.

Tableau 19: Fiches EcoInvent utilisées

Intitulé de la fiche	Catégorie de flux ou de procédé	Région de référence	Chaîne de production amont inclue	Utilisation (scénarios)
RER : petrol, low-sulphur, at regional storage [fuels]	[fuels] : Carburants	RER : Europe	OUI	Essence utilisée en tronçonneuse pour la récolte du bois (S2, S3, S4, S5, S8)
CH : operation, scooter [Street]	[Street] : Transport routier	CH : Suisse	NON	Combustion de l'essence dans la tronçonneuse (S2, S3, S4, S5, S8)
RER : diesel, burned in chopper [Benefication]	[Benefication] : Valorisation de carburants	RER : Europe	OUI	Production et combustion du diesel pour le broyage des plaquettes forestières (S8)
RER : operation, van <3,5t [Street]	[Street] : Transport routier	RER : Europe	OUI	Transport des carburants bois (S2, S3, S4, S5, S8)
FR : electricity mix [supply mix]	[supply mix] : Mix électrique fourni à l'utilisateur	FR : France	OUI	- Consommation électrique des systèmes (S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9) - Pelletisation (S3, S5) - Chauffage (S1, S2, S3)
RER : heat, natural gas, at industrial furnace low-NOx > 100 kW [heating systems]	[heating systems] : Systèmes de chauffage	RER : Europe	OUI	Production de gaz naturel et - consommation dans le réseau de chaleur (S8, S9) - consommation pour le séchage des granulés (S3, S5)
RER : heat, natural gas, at boiler condensing modulating < 100 kW [heating systems]		RER : Europe	OUI	Production de gaz naturel et consommation dans la chaudière individuelle (S6)
CH : heat, light fuel oil, at boiler 10 kW, non-modulating [heating systems]		CH : Suisse	OUI	Production de fioul domestique et consommation dans la chaudière (S7)

D. Analyse technico-économique

A partir de l'Inventaire de Cycle de Vie et de données de la littérature, on calcule pour chaque scénario de chauffage le coût moyen annualisé pour l'utilisateur. Aux consommations annuelles en carburant bois et fossiles s'ajoutent les frais de maintenance des équipements et l'amortissement de l'investissement initial.

Le coût annuel lié à l'investissement est calculé par la formule suivante, où I_0 représente l'investissement initial (diminué du crédit d'impôt pour les scénarios bois), τ le taux d'intérêt moyen qu'aurait pu rapporter l'argent s'il avait été placé en banque, et n la durée de vie des équipements.

$$C = I_0 \times \frac{\tau \times (1+\tau)^n}{(1+\tau)^n - 1} \quad \text{(E3)}$$

L'investissement initial et la durée de vie des équipements dépendent du scénario de chauffage. On prend pour tous les scénarios un taux d'intérêt de 2%.

D - 1. Données relatives au coût des équipements et combustibles

Malgré le nombre d'études publiées sur le sujet, les données brutes concernant les investissements et la maintenance des équipements sont difficiles à obtenir et à évaluer. Aussi, pour pouvoir comparer nos scénarios sur le plan économique du point de vue de l'utilisateur final, nous avons collaboré avec l'European Institute For Energy Research (EIFER), notamment Léa Dieckhoff et Guillaume Bardeau. Leur aide nous a été précieuse pour fiabiliser les données nécessaires. Le Tableau 20 présente les données technico-économiques sur les coûts d'installation, de maintenance, et d'opération des différents systèmes, tandis que le Tableau 21 présente les coûts de combustible. Les rendements thermiques indiqués pour les systèmes à bois sont issus de la modélisation Aspen Plus®. Les coûts des plaquettes forestières sont donnés pour une distance de transport de 20 à 150 km.

Les coûts d'investissement et de maintenance pour les équipements individuels à bois sont obtenus par une recherche en ligne de distributeurs et de chauffagistes. Les coûts d'investissement varient largement entre les différents systèmes, avec notamment un coût important des systèmes à granulés de bois. Pour les scénarios qui comportent un chauffage électrique (principal ou d'appoint), on considère l'installation de cinq radiateurs.

Les équipements individuels de chauffage à bois font l'objet d'une remise d'impôt correspondant à 30% de leur prix hors installation [Ministère de l'Économie et des Finances, 2015]. Cette remise d'impôts est déduite de l'investissement initial. Celui-ci est actualisé avec un taux de 2%. On considère une durée d'amortissement de 10 ans pour les poêles, 20 ans pour les chaudières individuelles, et 40 ans pour le réseau de chaleur. Le réseau est dimensionné pour une demande totale de 9.5 GWh par an. Les coûts rapportés ici sont ramenés à la consommation annuelle du ménage de 32.4 GJ. Les coûts d'investissement et de maintenance du réseau sont tirés de [Rogaume, 2005b].

Les scénarios à chaudière demandent plus d'investissement que les scénarios à chauffage électrique partiel ou total en raison du coût des radiateurs et de l'installation de la plomberie. Le scénario de chaudière à granulés est de loin le plus coûteux à l'installation : le coût total d'investissement atteint 20000 €, dont 4050 sont déduits grâce à la remise d'impôts sur les équipements de chauffage à bois. A l'inverse, la chaudière gaz à condensation est la moins coûteuse à installer. Les scénarios incluant un réseau de chaleur bénéficient d'économies d'échelle et parviennent à un niveau d'investissement inférieur à celui des autres scénarios à chaudières.

Les chaudières font l'objet d'une obligation d'entretien annuel par un professionnel [Ministère de l'Environnement, 2009]. Cet entretien est généralement plus coûteux pour les chaudières à granulés car ce sont des systèmes plus complexes que les chaudières à bûches. Pour toutes les technologies individuelles à bois, le conduit d'évacuation doit également être ramoné tous les deux ans [Premier Ministre, 1996].

Tableau 20: Données technico-économiques sur les différents scénarios

Scénario	Matériel et travaux nécessaires	Couverture des besoins en chauffage / eau chaude	Rendement thermique	Consommation électrique des appareils	Investissement total (matériel et main d'œuvre)	Crédit d'impôts disponible	Durée de vie des équipements (années)	Coût de maintenance
(S1)	5 radiateurs électriques	100% / 100%	100%	-	Radiateurs : 1.000 € Main d'œuvre : 200 €	-	10	-
(S2)	5 radiateurs électriques, poêle à bûches	Bois: 50% / 0% Electricité: 50% / 100%	67%	-	Poêle: 1.500 € Radiateurs: 1.000 € Main d'œuvre: 500 €	450 €	10	80 €·an^{-1}
(S3)	5 radiateurs électriques, poêle à granulés	Bois: 70% / 0% Electricité: 30% / 100%	90%	200 kWh·an^{-1}	Poêle: 2.500 € Radiateurs: 1.000 € Main d'œuvre: 1.000 €	750 €	10	150 €·an^{-1}
(S4)	Chaudière bûches + radiateurs, plomberie	100% / 100%	88%	400 kWh·an^{-1}	Chaudière: 6.500 + 1.500 € + 5.000 €	1.950 €	20	150 €·an^{-1}
(S5)	Chaudière granulés + radiateurs, plomberie	100% / 100%	87%	600 kWh·an^{-1}	Chaudière: 13.500 + 1.500€ + 5.000 €	4.050 €	20	250 €·an^{-1}
(S6)	Chaudière gaz à condensation + radiateurs, plomberie + connexion au réseau gaz	100% / 100%	105%	30 kWh·an^{-1}	5.000 € + 5.000 € + 500 €	-	20	150 €·an^{-1}
(S7)	Chaudière fioul + radiateurs, plomberie + cuve à fioul	100% / 100%	85%	30 kWh·an^{-1}	8.000 € + 5.000 € +1.500 €	-	20	150 €·an^{-1}
(S8)	Réseau de chaleur bois + radiateurs, plomberie	Bois: 90% / 90% Gaz: 10% / 10%	78% (pertes réseau 10%)	16 kWh·an^{-1}	4.000 € + 5.000 € (pour une résidence de 100 m^2)	-	40	80 €·an^{-1}
(S9)	Réseau de chaleur gaz + radiateurs, plomberie	100% / 100%	85% (avec pertes réseau)	200 kWh·an^{-1}	2.000 € + 5.000 € (pour une résidence de 100 m^2)	-	40	50 €·an^{-1}

En ordre de grandeur, les combustibles bois sont 100 fois moins chers que les combustibles fossiles, par unité d'énergie primaire (Tableau 21). Même si le rendement de chauffage des équipements à bois est généralement plus faible, ils restent donc intéressants si l'on ne considère que le coût du combustible.

Tableau 21: Prix des combustibles pour particuliers et chaufferies collectives

Combustible	Prix pour les particuliers	Prix pour une chaufferie collective	Source
Bûches (50cm)	170 €·tonne^{-1} ou 40,5 €·MWh$_{PCI}^{-1}$ (bûches labellisées, transport inclus)		[Dieckhoff & Authier, 2013]
Granulés	280 €·tonne^{-1} ou 61 €·MWh$_{PCI}^{-1}$ (transport inclus)		
Plaquettes forestières		70-80 €·tonne^{-1} ou 22,5-25,8 €M·Wh$_{PCI}^{-1}$	
Gaz naturel	6,6 c€·kWh$_{PCI}^{-1}$	5,1 c€·kWh$_{LHV}^{-1}$	[Selectra, n.d.]
Fioul léger	9,8 c€·kWh$_{LHV}^{-1}$		[Prix Fioul, n.d.]
Electricité (mix France)	15,1 c€kWh^{-1}	13,8 c€kWh^{-1}	[EDF SA, 2016]

D - 2. Résultats de l'analyse technico-économique

Les résultats de l'analyse technico-économique sont présentés dans la Figure 36. Les plus faibles coûts sont obtenus avec les réseaux de chaleur à bois ou à gaz, grâce aux économies d'échelle réalisées sur la construction, et au faible coût des combustibles utilisés.

Les systèmes à granulés de bois sont pénalisés par leur niveau d'investissement élevé. Ce désavantage n'est pas compensé suffisamment par le haut rendement thermique des systèmes, et la chaudière et le poêle à granulés sont les deux scénarios bois les plus onéreux. Seul le crédit d'impôt permet à la chaudière à granulés d'être au même niveau de coût que la chaudière à fioul. Le coût n'est cependant pas le seul critère de choix, et certains consommateurs pourraient estimer que ce surcoût est le prix à payer pour un système programmable et d'une plus grande facilité d'utilisation.

Les systèmes à bûches ont un coût du même ordre de grandeur que le scénario tout-électrique ou la chaudière à gaz. La hiérarchie de ces scénarios dans les années futures sera en grande partie dépendante de l'évolution du coût des combustibles et de l'électricité. Une rapide analyse de sensibilité a montré que si le prix du gaz et des équipements se maintient, le scénario de chaudière à bûches reste compétitif par rapport à la chaudière gaz jusqu'à 65% d'augmentation du prix du bois bûches.

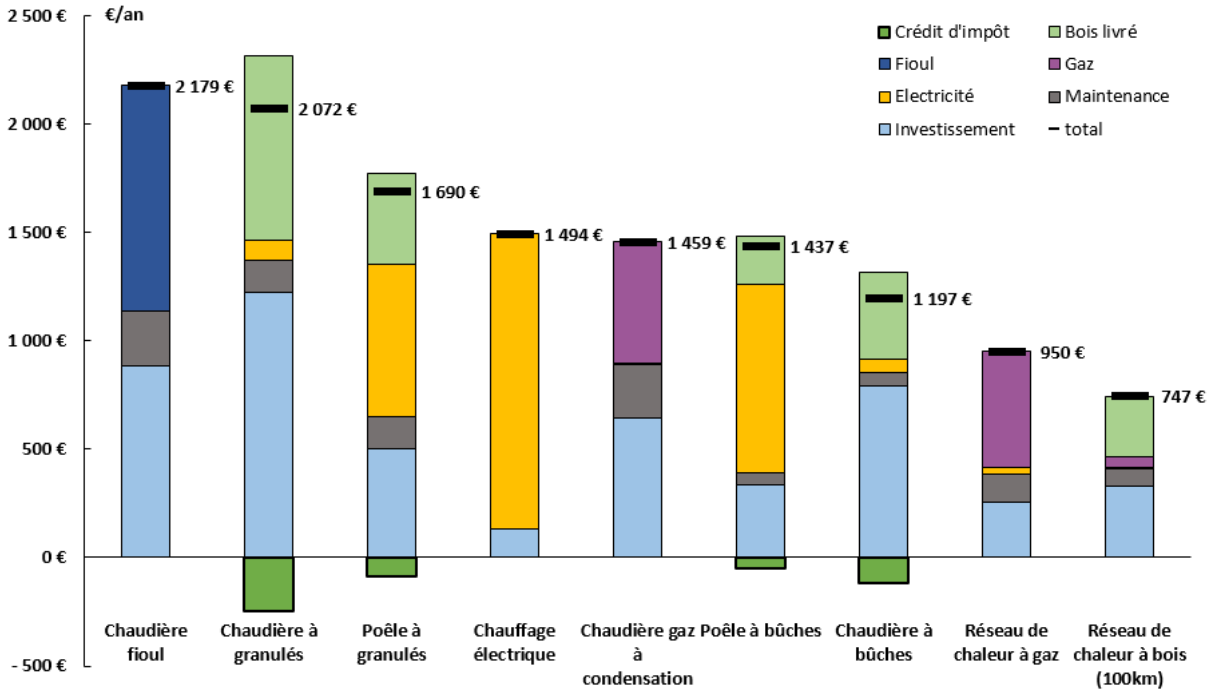


Figure 36: Décomposition par poste du coût moyen annualisé pour l'usager de chaque scénario (chauffage te production d'eau chaude sur un an, maison RT2005 de 100m² en Lorraine, 4 habitants)

L'analyse technico-économique présentée ici est bien sûr limitée en termes d'échelle. Un développement massif de l'utilisation du bois-énergie, et notamment des granulés, pourrait entraîner rapidement des changements dans les coûts de production et de transport (si le bois doit être importé de plus loin). Ce développement pourrait aussi avoir des coûts cachés sous la forme d'impacts environnementaux, de changement d'usage des sols etc. (§ A - 4.1.3). C'est pourquoi il faut mettre en parallèle l'analyse économique et l'évaluation des impacts des différents scénarios.

E. Evaluation des impacts

E - 1. ACV statique

Comme vu dans le paragraphe B Figure 26, le logiciel GaBi® permet à la fois de préciser l'Inventaire de Cycle de Vie par l'intermédiaire de modules de la base de données EcoInvent, et de calculer les impacts environnementaux de chaque scénario selon la méthode d'évaluation des impacts choisie.

E - 1.1. Représentation des scénarios sous GaBi®

Les différents scénarios de chauffage sont représentés dans le logiciel d'ACV GaBi® par une chaîne de processus individuels. La Figure 37 présente l'exemple du scénario « Chaudière à granulés » (S5). Les autres sont disponibles en annexe de ce document.

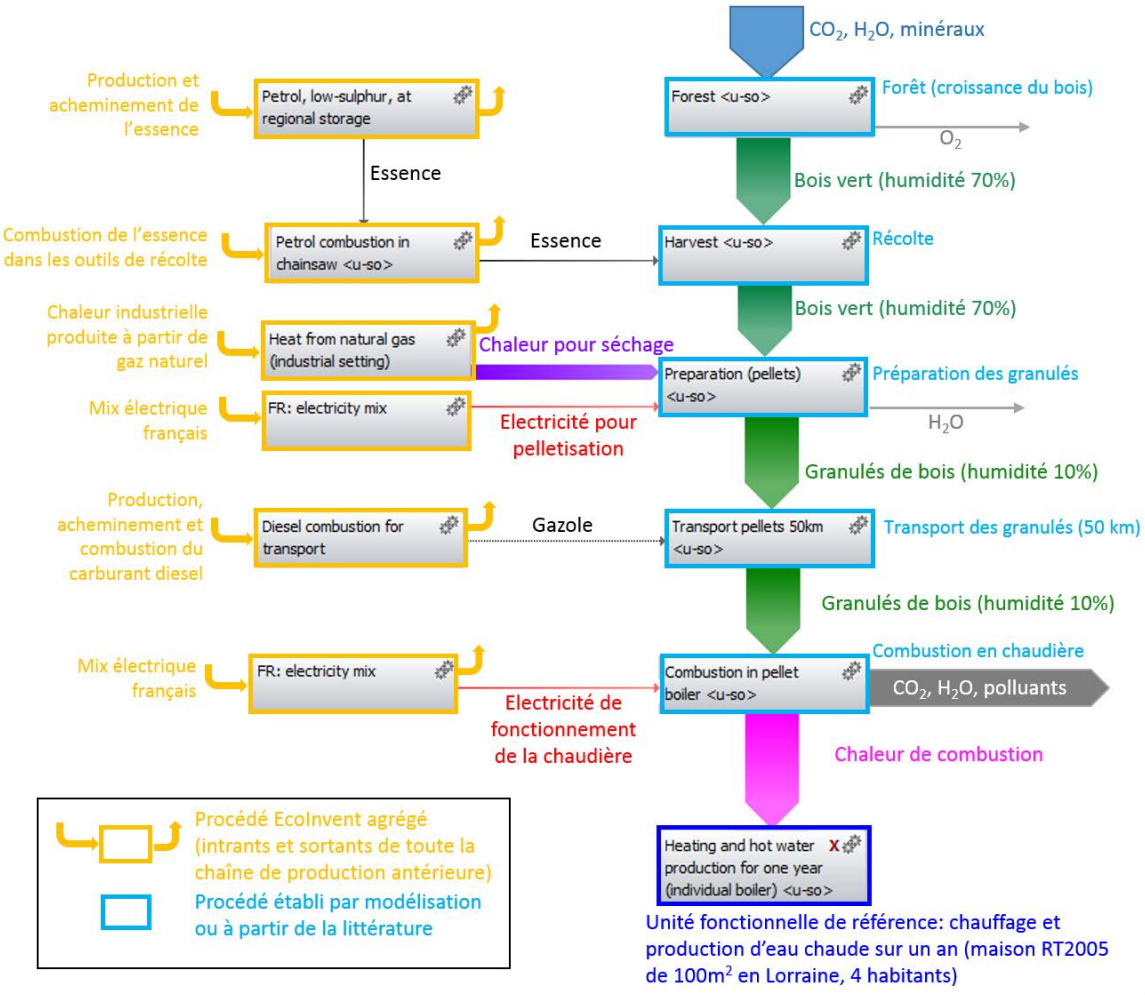


Figure 37: Représentation sous GaBi® du scénario Chaudière à granulés

La chaîne forêt-énergie est divisée en cinq modules. Le module Forêt est défini à partir des données GO+/CAT, les modules Récolte, Préparation et Transport à partir des données de la littérature (Tableau 3 page 27), et le module Combustion à partir des simulations Aspen Plus®. Pour la production de carburants fossiles et d'électricité, nous faisons appel à des processus issus de la base de données EcoInvent. L'électricité utilisée est celle du mix français.

E - 1.2. Impacts environnementaux – calcul par la méthode ReCiPe

La méthode de caractérisation des impacts principalement utilisée dans cette thèse est la méthode ReCiPe ; elle a été retenue parce que, comme on l'a vu dans l'état de l'art (chapitre A - 4.1.6), c'est l'une des méthodes ACV les plus complètes à l'heure actuelle. Pour illustrer les problèmes de comptabilité du CO_2 biogénique, l'impact changement climatique est également calculé selon la méthode CML 2001, largement répandue dans les études ACV.

Les résultats détaillés par étape pour tous les scénarios sont disponibles en Annexe V. Les impacts « épuisement des énergies fossiles », « épuisement des métaux », « écotoxicité » et « toxicité pour l'Homme » sont présentés plus loin. Le scénario « Réseau de chaleur à plaquettes de bois » (S8) est présenté ici pour la distance de transport intermédiaire, 100 km. Les impacts liés au transport de 50 ou 150 km sont disponibles en Annexe V. L'impact Changement Climatique est discuté en détails au paragraphe E - 1.3.

Pour tous les scénarios bois, la phase combustion est, en-dehors de la consommation d'électricité des scénarios poêle à bûches et poêle à granulés, la phase qui pèse le plus sur les impacts changement climatique, acidification terrestre, toxicité humaine, eutrophisation marine, formation de particules et d'oxydants photochimiques. Pour les scénarios à bûches, vient ensuite la phase de récolte, alors que dans les scénarios à granulés, la préparation du combustible a des impacts plus importants. Pour le réseau de chauffage à bois, les impacts de ces deux étapes sont du même ordre de grandeur.

Parmi les scénarios fossiles, le chauffage électrique domine tous les impacts liés à l'eau (épuisement des ressources, eutrophisation, écotoxicité), ainsi que la toxicité humaine et la production de radiations ionisantes. Ceci est dû à la prédominance de l'énergie nucléaire dans le mix électrique français. Les consommations d'essence et de diesel ont principalement un impact sur l'écotoxicité des milieux, la toxicité humaine, l'épuisement de la couche d'ozone et bien sûr l'épuisement des ressources fossiles.

Certains points intéressants à retenir sont les suivants :

- L'impact changement climatique des scénarios bois est relativement élevé lorsqu'il est évalué par la méthode ReCiPe (Figure 42). Ceci est lié au problème de comptabilisation du CO_2 biogénique (§ E - 1.3).
- Par contre, les scénarios bois ont des impacts très limités sur l'appauvrissement des ressources fossiles et de la couche d'ozone.
- Les impacts principaux liés à l'étape de combustion du bois sont le changement climatique, l'acidification terrestre (par émission d'oxydes de soufre), l'eutrophisation marine (émission d'oxydes d'azote), la formation de particules et d'oxydants photochimiques. Le poêle à bois (S2) présente le maximum de formation d'oxydants photochimiques, en raison de la forte concentration de COVs dans les fumées.
- Les scénarios à forte consommation d'électricité (S1, S2, S3) sont dominés par les impacts liés au mix électrique français, plus précisément au nucléaire. Ils présentent donc de forts impacts potentiels sur les eaux douces, les radiations ionisantes et par extension la santé humaine [Vakil & Harvey, 2009].
- Les scénarios à base de granulés de bois souffrent fortement des impacts de l'étape de fabrication des granulés.

La Figure 38 présente les impacts « épuisement des énergies fossiles » et « épuisement des métaux » pour les différents scénarios. Comme on pouvait s'y attendre, les scénarios bois ont des impacts modérés sur l'épuisement des énergies fossiles en comparaison avec les scénarios à gaz naturel (S6, S9) ou à fioul (S7). En revanche, leur impact « épuisement des métaux » est assez élevé. Les facteurs contribuant à cet impact sont 1) la consommation d'énergie électrique et surtout 2) la formation du bois et l'exportation de ses minéraux en-dehors de la forêt. On peut donc utiliser cet impact comme un premier indicateur des risques posés par la sylviculture à la fertilité des sols.

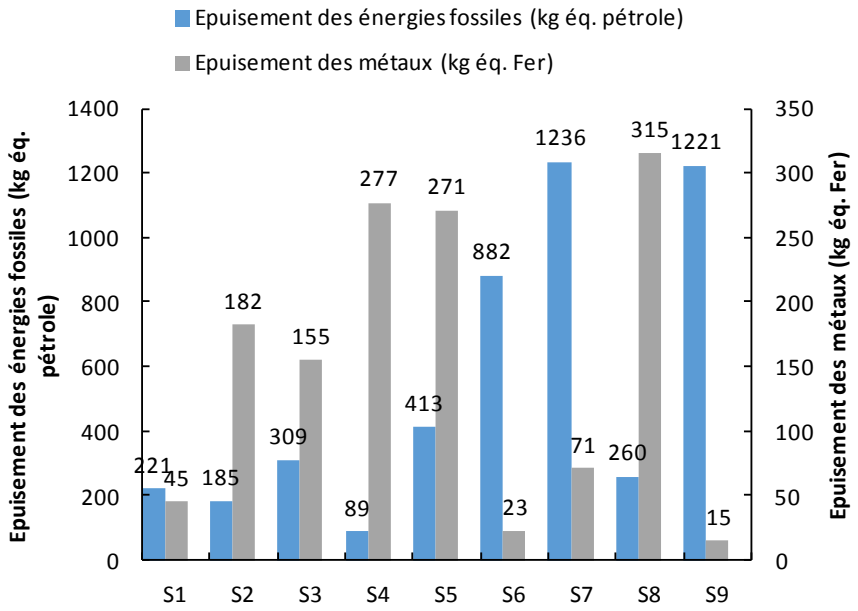


Figure 38: Impacts Epuisement des énergies fossiles et des métaux des différents scénarios selon la méthode ReCiPe (UF: chauffage et production d'eau chaude sur un an pour une maison de 100 m² en Lorraine, 4 occupants)

La Figure 39 présente l'impact Ecotoxicité des scénarios sur les eaux douces, le milieu marin, et le milieu terrestre. Les principaux flux responsables de l'Ecotoxicité sur les eaux sont l'électricité et les carburants fossiles, alors que l'écotoxicité du milieu terrestre est principalement causée par la combustion du bois (détails Annexe V). La comparaison des scénarios est délicate sur ces impacts, car bien que calculés ici en moyenne, ils sont en réalité très dépendants de l'environnement local et de sa sensibilité. Une ACV spatialisée permettrait de mieux les cerner, mais ceci dépasse le cadre de ce travail.

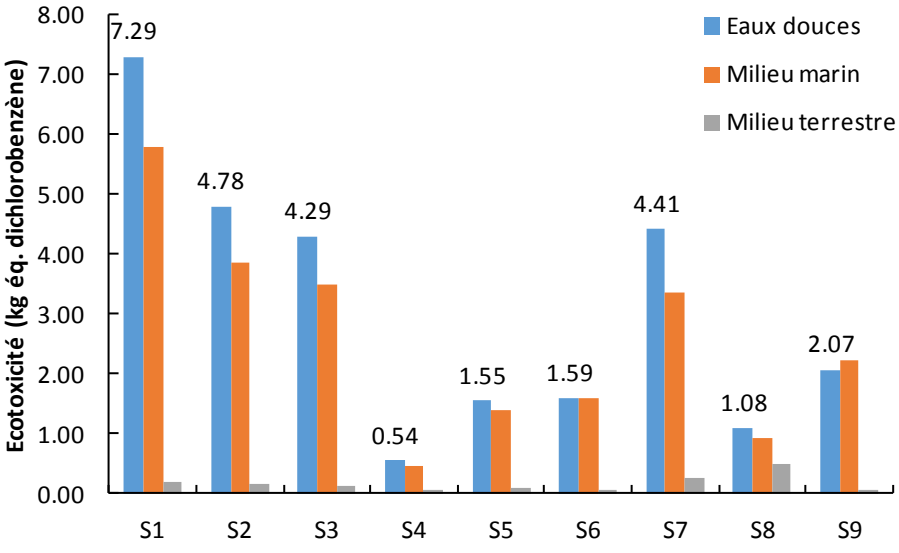


Figure 39: Impact Ecotoxicité des différents scénarios selon la méthode ReCiPe (UF: chauffage et production d'eau chaude sur un an pour une maison de 100 m2 en Lorraine, 4 occupants)

Ces mêmes flux ont un fort impact sur le potentiel de Toxicité Humaine (Figure 40). Le mix électrique français a un poids très important en raison de la prévalence de l'énergie nucléaire. On constate également un fort impact de la combustion du bois dans le poêle à bûches (S2). Les polluants responsables sont principalement les particules et les COV non méthaniques. C'est là l'un des principaux inconvénients de cette technologie, d'autant que les polluants contaminent partiellement l'air intérieur de l'habitation lors du chargement de nouvelles bûches, et que les taux d'émission peuvent varier fortement selon le taux de charge, l'utilisation et la maintenance des équipements.

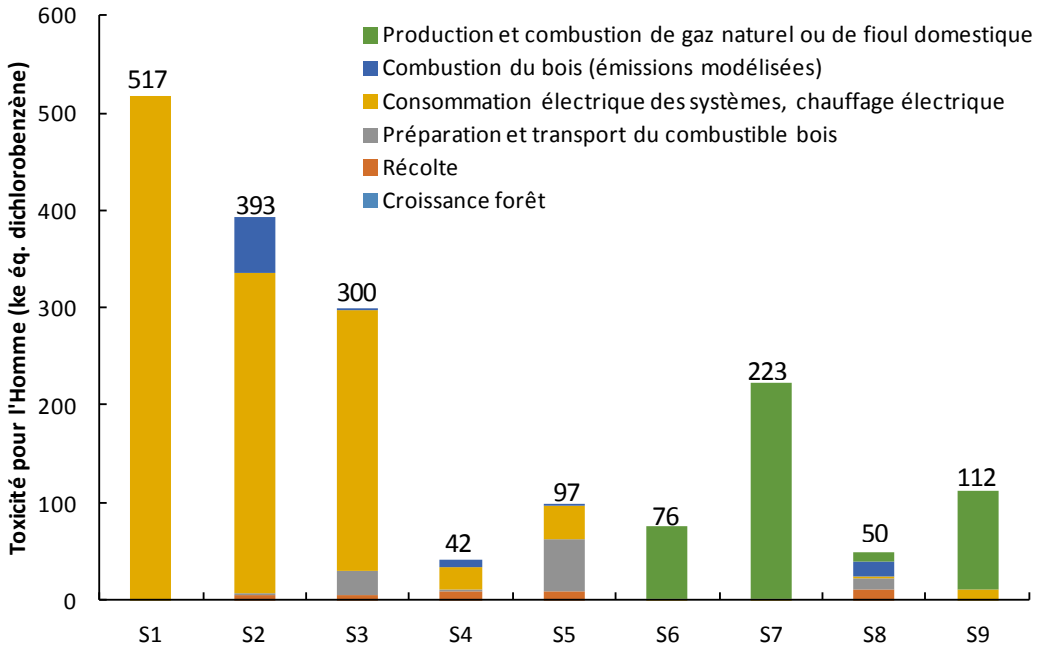


Figure 40: Impact Toxicité pour l'Homme des différents scénarios selon la méthode ReCiPe (UF: chauffage et production d'eau chaude sur un an pour une maison de 100 m2 en Lorraine, 4 occupants)

Les scénarios utilisant des granulés de bois (S3, S5) sont pénalisés, pour tous les impacts, par le séchage et la préparation des granulés. La Figure 41 présente le pourcentage des impacts dû à chaque étape du scénario chaudière à granulés (S5).

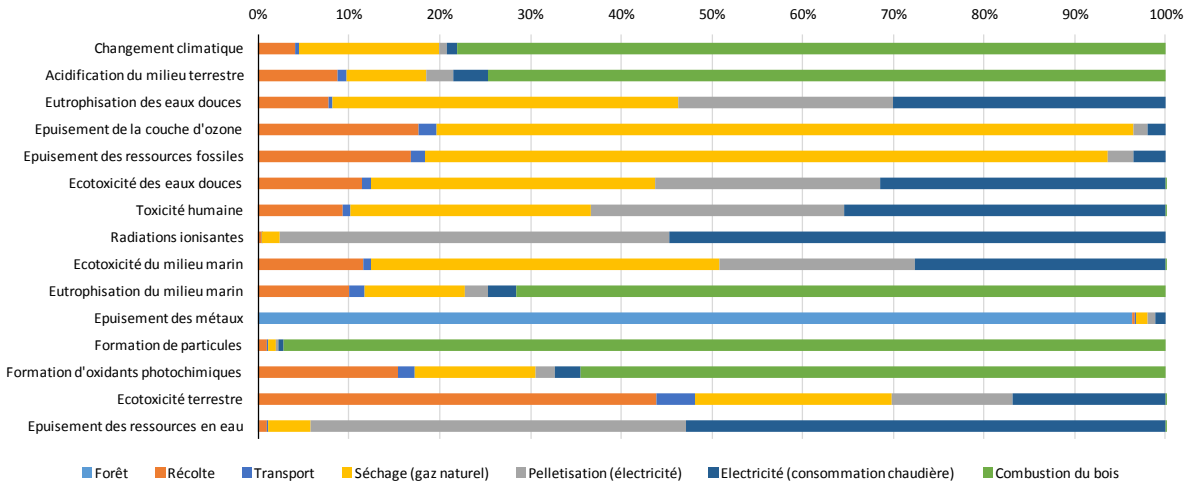


Figure 41: Poids de chaque étape dans les impacts environnementaux du scénario « chaudière à granulés » (S5)

La fabrication (séchage et pelletisation) compte pour plus de 50% du total pour six impacts sur quinze : épuisement des ressources fossiles, appauvrissement de la couche d'ozone, eutrophisation des eaux douces, écotoxicité des eaux douces et du milieu marin, toxicité pour l'homme. Ces impacts pourraient être atténués dans le futur si le progrès technologique permet une réduction significative des besoins en énergie pour cette étape, ou si plus d'énergies renouvelables étaient employées dans la fabrication des granulés.

E - 1.3. L'impact Changement Climatique

La Figure 42 présente l'impact Changement Climatique des différents scénarios selon la méthode ReCiPe, pour chaque grande étape de la chaîne de production. Le scénario « Réseau de chaleur à plaquettes de bois » (S8) est présenté ici pour la distance de transport intermédiaire, 100 km. Les impacts liés au transport de 50 ou 150 km sont disponibles en Annexe V.

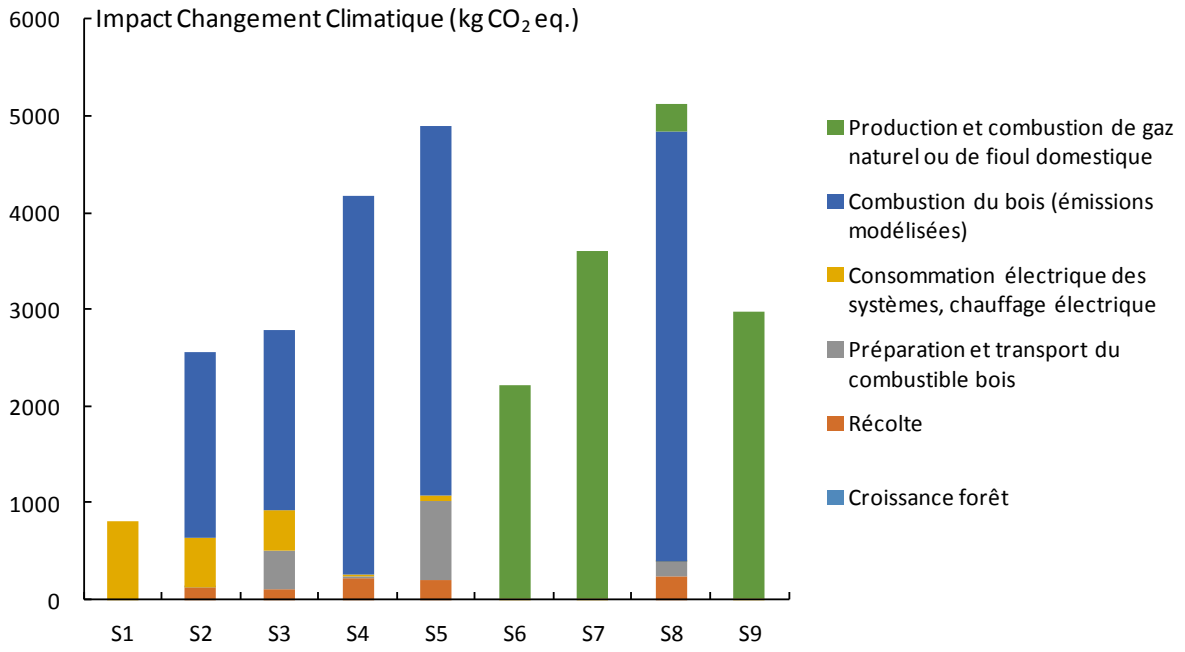


Figure 42: Impact Changement Climatique des différents scénarios selon la méthode ReCiPe (UF: chauffage et production d'eau chaude sur un an pour une maison de 100 m² en Lorraine, 4 occupants)

La phase la plus contributrice est dans tous les cas la phase de chauffage proprement dite, et en particulier la combustion du bois, du gaz naturel, ou du fioul. Les facteurs de caractérisation des polluants mineurs comme les COV non méthaniques font encore l'objet de beaucoup d'incertitudes. C'est pourquoi il y a beaucoup de variation entre les différentes méthodes d'évaluation des impacts, et ce d'autant plus que les émissions de polluants sont importantes. La Figure 43 présente l'impact changement climatique lié aux polluants mineurs de la combustion dans le scénario poêle à bûches (sans le CO_2 de combustion ni les autres étapes de la chaîne), pour la méthode ReCiPe et la méthode CML 2001. Cet impact est multiplié presque par 3 en passant aux facteurs de caractérisation de CML 2001, qui sont pourtant moins récents. Il pourrait s'agir ici d'un problème lié aux espèces polluantes retenues, et notamment aux cinq HAP représentatifs des émissions de combustion du modèle Aspen Plus®. Ces espèces ne correspondraient à aucun facteur de caractérisation ReCiPe.

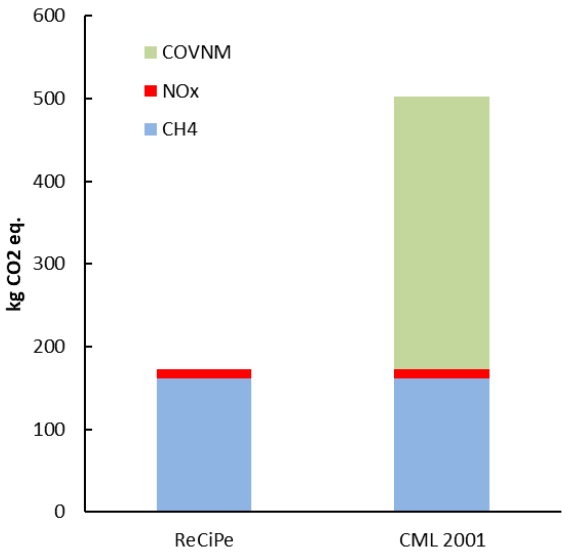


Figure 43: Variation de l'impact Changement Climatique lié aux polluants mineurs selon la méthode d'évaluation des impacts, scénario « poêle à bûches » (S2)

En raison de la quantité restreinte de polluants produits, leur poids dans l'impact total des scénarios (présenté Figure 44) reste faible. Néanmoins, ceci illustre une incertitude qu'il convient de garder à l'esprit lors de l'interprétation des résultats.

Une variation bien plus importante entre les différentes méthodes ACV concerne la prise en compte du CO_2 absorbé lors de la phase de croissance de la forêt. Sur la Figure 42, la phase de croissance n'apparaît pas du tout, car la méthode ReCiPe ne prend pas en compte l'absorption de CO_2 lors de cette phase. Si l'on considère l'absorption de CO_2 comme instantanée, venant en déduction des émissions de la combustion, alors l'impact Changement Climatique des scénarios bois est beaucoup plus intéressant, surtout lorsque l'on considère leur faible coût pour l'usager (§ D - 2). C'est là une différence importante entre les différentes méthodes ACV : la prise en compte du CO_2 absorbé. Par exemple, la méthode CML2001 attribue au CO_2 absorbé un facteur de caractérisation de -1 kg CO_2 éq., alors que dans ReCiPe il n'est tout simplement pas pris en compte.

La Figure 44 présente l'impact changement climatique des différents scénarios selon les méthodes ReCiPe et CML 2001. Est également inclus, pour les scénarios bois, l'impact qui serait donnée par CML s'il n'y avait pas d'absorption de CO_2. Les résultats sont alors virtuellement identiques à ceux de la méthode ReCiPe.

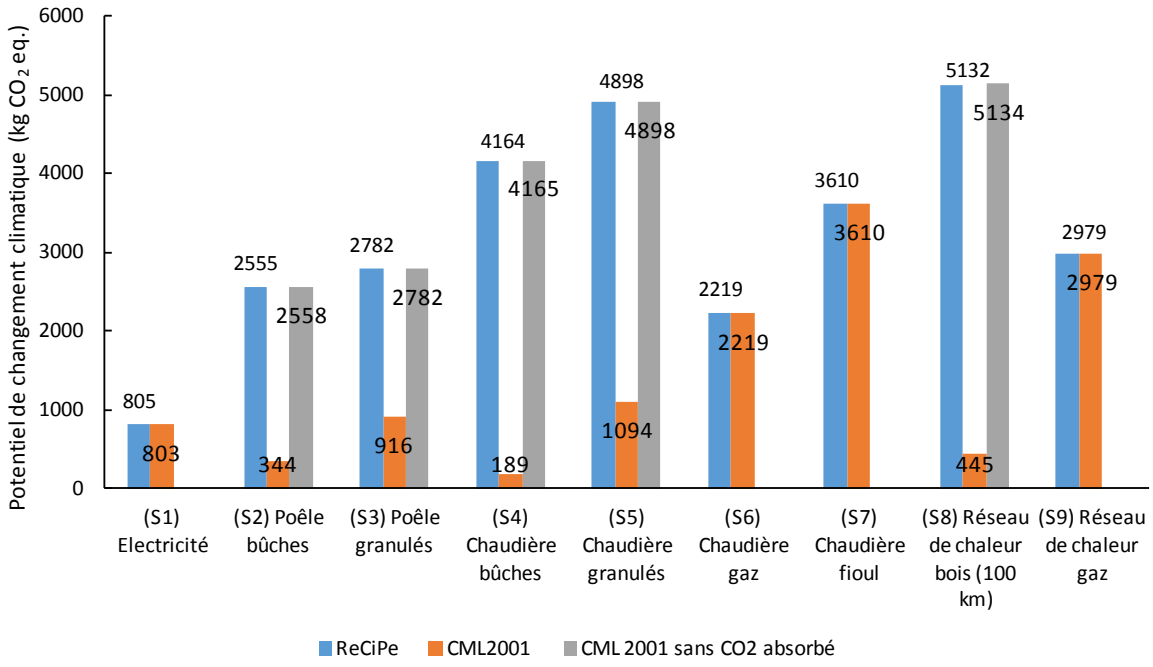


Figure 44: Impact changement climatique des différents scénarios (méthode ReCipe et CML 2001)

La Figure 45 présente le coût et l'impact changement climatique des différents scénarios selon les deux méthodes, ReCiPe et CML2001. Les scénarios bois paraissent beaucoup plus vertueux avec la méthode CML2001 (réduction entre 67% et 95% de l'impact), du fait de la comptabilité négative du CO_2 absorbé. Ainsi le scénario de réseau de chaleur à bois (S8) passe d'un impact de 0.15 kg CO_2eq./MJ à 0.014 kg CO_2eq./MJ, ce qui est dans le même ordre de grandeur que les analyses de la littérature, bien qu'encore assez élevé (chapitre A - 4.2, Tableau 10).

Les scénarios à granulés souffrent toujours du poids de la phase de transformation, mais ils présentent néanmoins un impact plus faible que tous les scénarios fossiles, hormis le tout-électrique. Non seulement les scénarios bois ont un impact apparent beaucoup plus intéressant avec la méthode CML, mais la hiérarchie même des scénarios bois change en passant d'une méthode à l'autre. En effet, avec ReCiPe, l'impact augmente avec la consommation de bois, car il y a plus d'émissions de récolte, transformation, transport, et surtout de combustion. Mais avec CML, puisque le CO_2 absorbé est déduit de l'impact final, plus la consommation de bois est élevée et plus l'impact total est faible. Il y a donc une inversion de rang entre les scénarios qui consomment peu de bois (S2, S3), vertueux avec ReCiPe, et les scénarios en consommant plus (S4, S5, S8). Le gain reste plus faible pour les scénarios S3 et S5 à cause de la phase de préparation des granulés de bois.

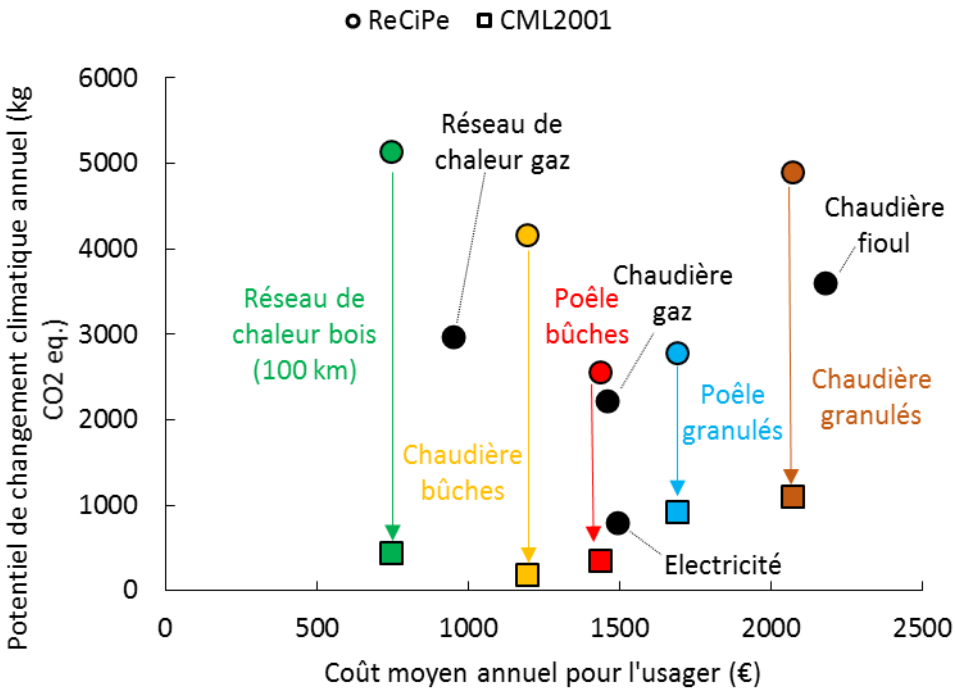


Figure 45: Potentiel de changement climatique relatif au coût pour l'usager (méthodes ReCiPe et CML2001)

L'approche par soustraction directe et instantanée du CO_2 est une grossière approximation des phénomènes physiques réels. En effet, la réabsorption du CO_2 par la forêt se fait sur des durées longues, et le gaz participe à l'effet de serre pendant son temps de séjour dans l'atmosphère. C'est pourquoi, comme nous l'avons présenté dans l'état de l'art (§ A - 4.1.7), il est important de considérer l'évolution dynamique du CO_2. La partie suivante présente nos résultats sur l'ACV dynamique.

E - 2. ACV dynamique

L'ACV dynamique s'appuie sur les courbes de potentiel global de réchauffement climatique des gaz à effet de serre en fonction du temps qui ont été présentées Figure 18 et Figure 19 dans la partie A - 4.1.7 de l'état de l'art. Ces courbes ne sont pas disponibles pour les polluants mineurs tels que les COV non méthaniques. L'analyse ne tient donc compte que des émissions de CO_2, CH_4 et CO.

E - 2.1. Méthode de calcul du potentiel de réchauffement dynamique

On établit des courbes d'émissions nettes de CO_2, CH_4 et CO à partir des émissions de la chaufferie collective et des simulations GO+ pour le pin ou d'un modèle simplifié de croissance pour le hêtre (hypothèses détaillées § E - 2.3.1). A partir de ces courbes d'émissions, l'impact dynamique est calculé à l'aide d'un classeur Excel suivant l'équation (E2) vue dans l'état de l'art (A - 4.1.7). La Figure 46 donne un aperçu de la feuille de calcul pour le CO_2. La méthode est identique pour CH_4 et CO et seule la courbe de référence du potentiel global de réchauffement climatique AGWP(t) change.

Année d'émission	0	1	2	...	250	Impact total
Année d'impact	E(0)	E(1)	E(2)	...	E(250)	
0	E(0)*AGWP$_{CO2}$(0)					Somme(année 0)
1	E(0)*AGWP$_{CO2}$(1)	E(1)*AGWP$_{CO2}$(0)				Somme (année 1)
2	E(0)*AGWP$_{CO2}$(2)	E(1)*AGWP$_{CO2}$(1)	E(2)*AGWP$_{CO2}$(0)			Somme (année 2)
3	E(0)*AGWP$_{CO2}$(2)	E(1)*AGWP$_{CO2}$(2)	E(2)*AGWP$_{CO2}$(1)	...		Somme (année 3)
...	...	...	...	...		...
...	...	...	...	...		...
249	E(0)*AGWP$_{CO2}$(249)	E(1)*AGWP$_{CO2}$(248)	E(2)*AGWP$_{CO2}$(247)	...		...
250	E(0)*AGWP$_{CO2}$(250)	E(1)*AGWP$_{CO2}$(249)	E(2)*AGWP$_{CO2}$(248)	...	E(250)*AGWP$_{CO2}$(0)	Somme (année 250)

Figure 46: Méthode de calcul de l'impact dynamique sous Excel - exemple du CO_2

E - 2.2. Pin

E - 2.2.1. Hypothèses de calcul des émissions annuelles

Le modèle GO+ fournit l'absorption de CO_2 par la forêt pour chaque année, ainsi que les productions de bois-énergie et d'autres produits bois (§ 0). On suppose que chaque année, le bois-énergie produit par la forêt et par le recyclage des autres produits bois est utilisé en chaufferie collective.

E - 2.2.2. Résultats de l'ACV dynamique sur le pin

La Figure 47 présente le potentiel de réchauffement climatique absolu pour les six scénarios. Dans tous les scénarios de réchauffement global, l'itinéraire sylvicole intensif (ITK1) diminue très légèrement l'effet de puits de la forêt.

Sur un siècle, la contribution du massif au réchauffement climatique augmente de 5.5%, 3.9% et 4.4% respectivement dans les RCP 2.6, 4.5 et 8.5. Ceci est dû à la fois à la perte de carbone stocké dans le sol et à la baisse de production des produits bois à moyenne et longue durée de vie. Il y a une nette perte, d'une part de l'effet de puits de la forêt, et d'autre part de l'effet bénéfique de la cascade des produits. Et cette augmentation du potentiel de réchauffement climatique n'est pas compensée par l'augmentation de la production d'énergie ; la variation de l'impact ramené à la production d'énergie totale sur la période est en effet de 9.0%, 7.5% et 6.8% respectivement.

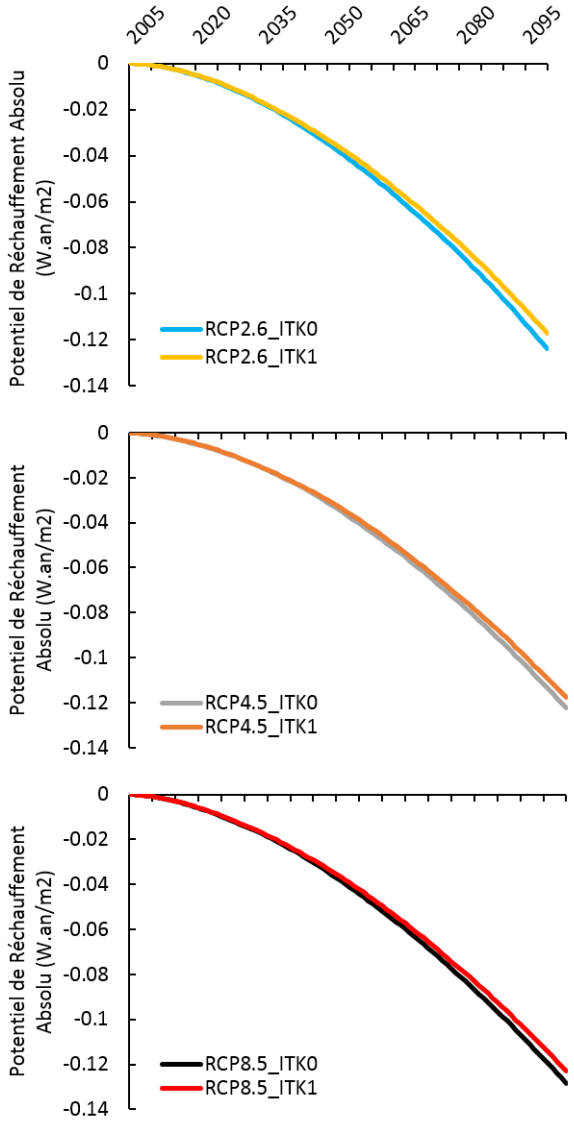


Figure 47: Potentiel de réchauffement absolu pour les six scénarios de croissance de la forêt landaise

La variation de l'impact sur l'ensemble du massif reste faible, notamment parce que toutes les parcelles ne sont pas au même stade de développement au même moment. La Figure 48 présente la production primaire nette du massif forestier dans les six scénarios ; l'absorption nette de carbone oscille avec les années mais reste du même ordre de grandeur. L'effet du raccourcissement du cycle forestier est plus visible sur une parcelle homogène, comme l'exemple pris ci-dessous pour le hêtre.

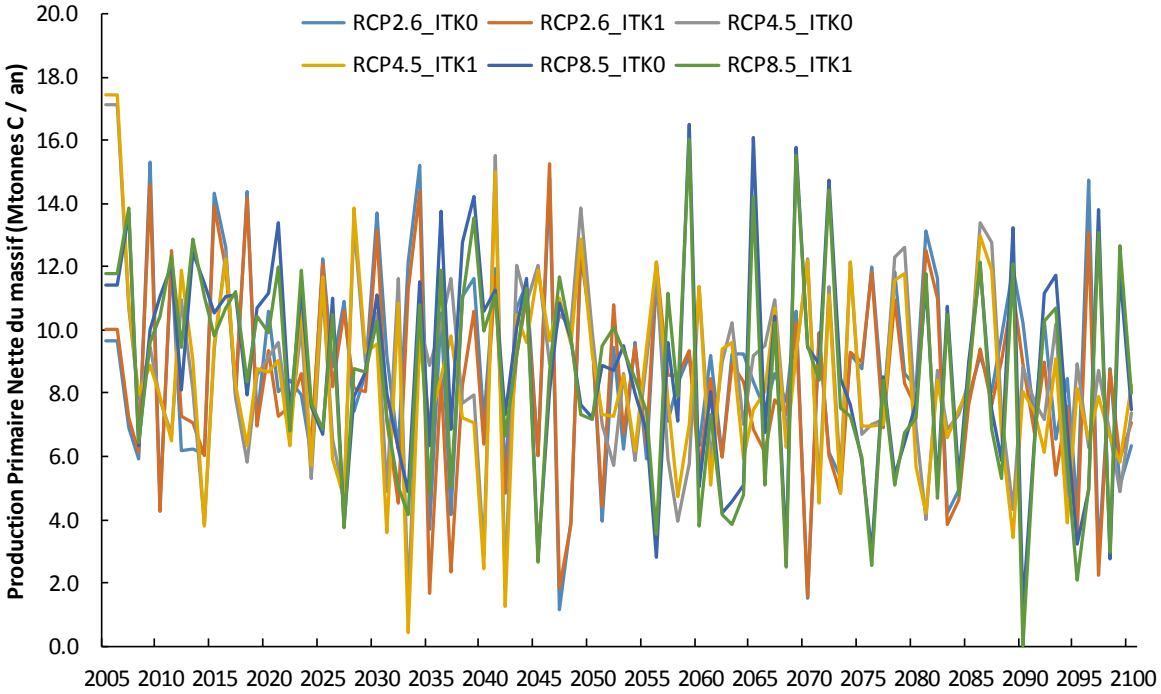


Figure 48: Production Primaire Nette du massif forestier landais dans les 6 scénarios étudiés

E - 2.3. Hêtre

E - 2.3.1. Hypothèses de calcul des émissions annuelles

Comme vu dans le paragraphe A - 5.1.1, le modèle GO+ n'est pas encore disponible pour le hêtre, aussi une fonction simplifiée de croissance est utilisée. On considère trois scénarios de gestion d'une parcelle de hêtre, caractérisés par la durée du cycle de production (140, 100 ou 60 ans). A la fin du cycle, les arbres sont abattus et brûlés en chaufferie, comme pour le cas du pin. Une partie de la biomasse formée reste en forêt et se décompose au sol. La décomposition produit du CO_2 et du CH_4 en quantités molaires égales [Levasseur et al., 2012]. Pour visualiser les effets sur plusieurs cycles, une durée d'observation de 250 ans est retenue. La Figure 49 présente les profils d'absorption de CO_2 pour chacun des scénarios retenus.

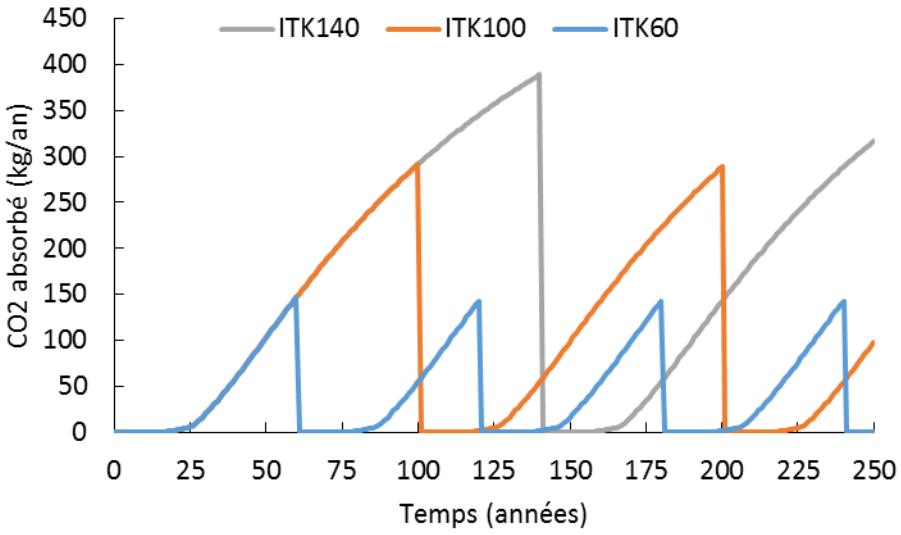


Figure 49: Profil d'absorption de CO_2 pour une parcelle homogène de hêtre dans trois scénarios sylvicoles

L'une des différences par rapport à la simulation par GO+ sur le pin maritime est que notre simulation simplifiée de hêtre n'intègre ni le sous-bois ni la vie microbienne du sol, uniquement les arbres. On remarque que, sur les durées de cycle observées, l'absorption de CO_2 augmente continuellement avec le temps. En effet, la sénescence dans les massifs de hêtre n'est pas généralement observée avant 150 ans environ [Fortin, 2016]. A long terme, la croissance des arbres ralentit et l'absorption de carbone compense de moins en moins les émissions liées à la décomposition de la litière forestière (feuilles, petits bois, etc.). A l'échelle de temps observée ici, avec les hypothèses retenues (même densité de plantation, pas de sénescence), il semble plus intéressant pour le contrôle du carbone atmosphérique de laisser pousser les arbres plutôt que de les couper rapidement.

Les cycles courts pourraient tout de même être intéressants s'il s'avère que leur production rapide de biomasse-énergie compense leur plus faible absorption de carbone. Cependant, là aussi, les cycles longs sont plus avantageux. La production de bois sur un seul cycle est divisée par deux entre les scénarios à 140 et 100 ans, et par 10 entre 140 et 60 ans (Tableau 22). Le plus grand nombre de cycles sur la période considérée ne permet pas de rattraper complètement cet écart : la production moyenne d'énergie sur 250 ans est divisée par quatre entre les itinéraires à 140 et 60 ans. Cependant, il est à noter que dans une mise en place réelle d'itinéraires intensifs, les sylviculteurs ne se contenteraient pas de réduire la durée du cycle, mais augmenteraient la densité de plantation, ce qui n'est pas inclus dans nos hypothèses. Aussi l'écart réel de production devrait être plus réduit.

Tableau 22: Production de bois et émissions des trois itinéraires sylvicoles d'une parcelle homogène de hêtre

Itinéraire sylvicole		ITK140	ITK100	ITK60
Bois sec récolté à la fin du cycle (kg)		12.470	5.700	1.270
Bois laissé en forêt (kg)		1.840	850	195
Produits de la combustion (kg)	CO_2	20.700	9.460	2.110
	CH_4	0,88	0,41	0,09
	CO	0,92	0,42	0,10
Produits de la décomposition (kg)	CO_2	1.690	780	180
	CH_4	615	285	65
Energie issue de la combustion (MJ)		23.690	10.915	2.510
Nombre de cycles sur 250 ans		1,79	2,50	4,17
Energie produite en moyenne sur 250 ans (MJ)		42.300	27.290	10.455

E - 2.3.2. Résultats de l'ACV dynamique sur le hêtre

A partir des émissions de combustion et de décomposition calculées dans le Tableau 22, il est possible d'effectuer le calcul du potentiel absolu de réchauffement climatique des trois itinéraires, présenté en Figure 50. Ces courbes ne permettent pas facilement de tirer de conclusions sur la supériorité de l'un ou l'autre scénario en termes d'impact brut. En effet, selon l'horizon de temps auquel les courbes sont observées, la hiérarchie des scénarios varie.

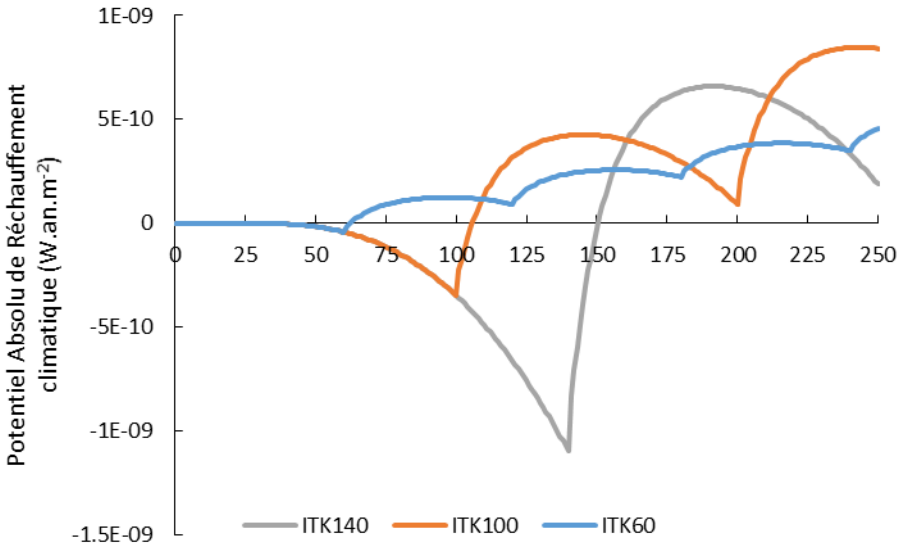


Figure 50: Potentiel absolu de réchauffement climatique pour les trois scénarios de hêtre

La Figure 51 présente les résultats exprimés par rapport à l'énergie totale produite. Ceux-ci sont plus parlants : pour une même quantité d'énergie produite, les cycles courts ont un impact nettement plus important sur le changement climatique. En effet, les phases d'émissions sont beaucoup plus rapprochées, et l'impact commence à peine à être résorbé par l'absorption qu'un nouveau dégagement s'effectue. L'impact se cumule sans jamais être assez compensé.

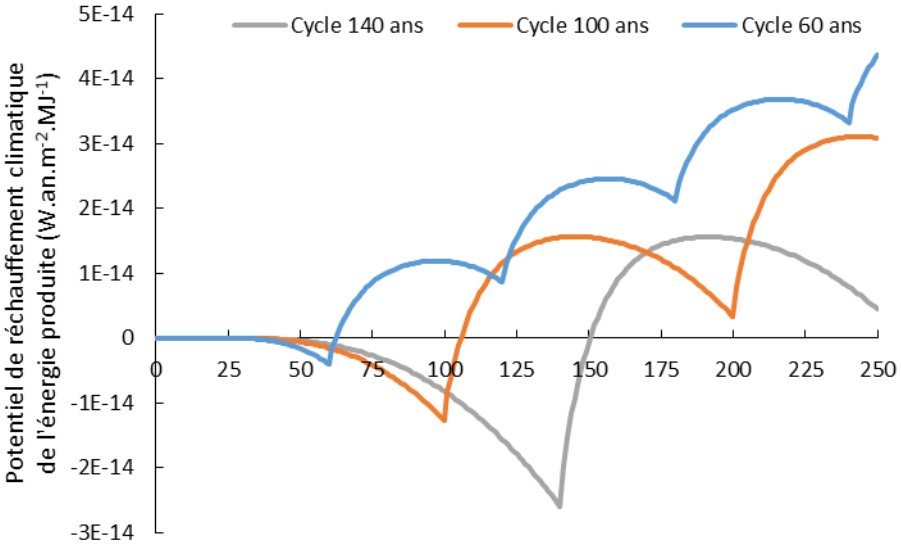


Figure 51: Potentiel de réchauffement climatique par unité d'énergie produite

Ensuite, nous considérons une parcelle de hêtre de 140 ans, récoltée et brûlée en chaufferie. Du point de vue du changement climatique, quel itinéraire sylvicole permet le mieux d'atténuer l'impact de ce pic initial de GES ? Est-ce plutôt un cycle long avec des pics d'émissions rares mais aussi intenses que le premier, ou au contraire un cycle court, présentant des pics plus faibles mais plus fréquents ? La Figure 52 présente les résultats du calcul d'ACV dynamique sur les trois hypothèses. Le pic d'émissions initial se produit à t=0, puis les trois scénarios suivent les profils d'absorption présentés Figure 49, et à chaque récolte le bois produit est brûlé.

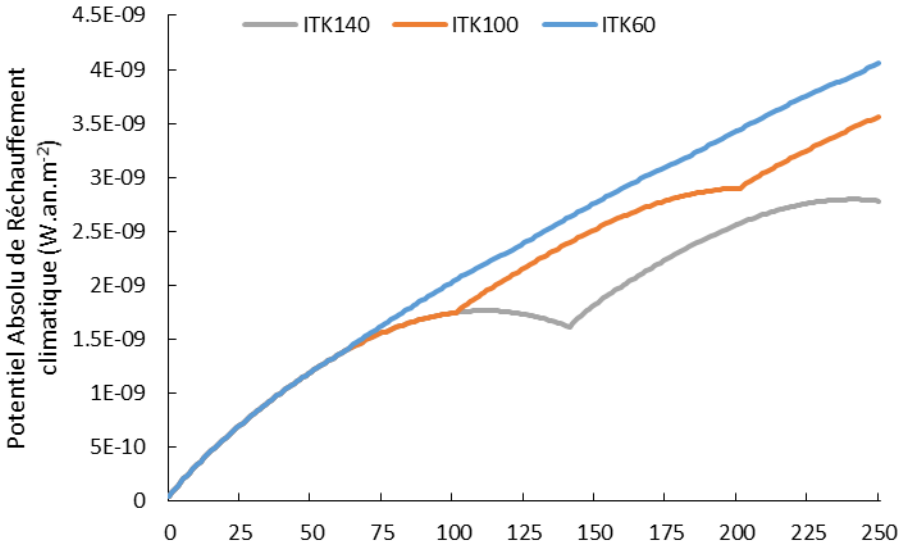


Figure 52: Potentiel Absolu de réchauffement climatique - avec combustion initiale de la biomasse

Encore une fois, les résultats favorisent les cycles de production longs. En effet, dans les cycles plus courts, l'absorption de CO_2 par les arbres n'atténue que faiblement l'impact avant qu'un nouveau pic d'émissions ne survienne. De plus, l'énergie produite est plus faible dans les cycles courts.

Il est à noter que ces résultats découlent de l'hypothèse selon laquelle les arbres sont plantés après la combustion initiale. Mais on pourrait argumenter que les arbres ont été plantés dans le but d'être brûlés pour produire de l'énergie, et donc que la croissance de la forêt se produit avant la combustion.

Ce problème de frontières temporelles dans l'ACV dynamique est très bien démontré dans [Levasseur et al., 2013] ; les résultats de l'ACV dynamique de la combustion d'une chaise sont très différents selon que la combustion est considérée comme survenant avant ou après la phase de séquestration. La Figure 53 illustre ce phénomène sur le cas théorique d'un cycle du hêtre de 60 ans. Dans le scénario 1, la croissance des arbres s'effectue avant la combustion du bois ; dans le scénario 2, elle s'effectue après. On ne considère qu'un seul cycle dans chaque scénario.

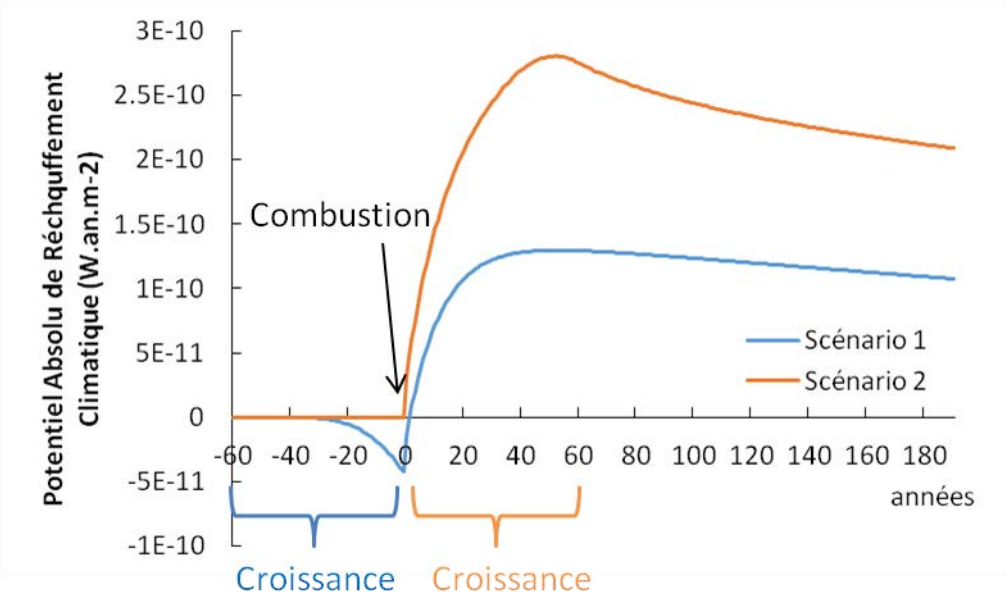


Figure 53: Illustration de l'influence de la temporalité sur les résultats d'une ACV dynamique

Le scénario 1 paraît beaucoup plus vertueux que le scénario 2. Cependant, il s'agit d'un artifice de calcul qui ne se justifie pas dans une perspective de comparaison des systèmes bois avec les systèmes fossiles. L'analyse doit commencer au moment où le changement se produit : ici, la combustion de bois plutôt que de gaz naturel par exemple. De plus, comptabiliser la croissance avant la combustion interdit toute comparaison entre des itinéraires sylvicoles de durée différente, puisque chaque scénario aurait des frontières temporelles différentes.

E - 3. Conclusions de l'analyse ACV

Les résultats de l'ACV attributionnelle montrent que le bois-énergie peut être une alternative aux énergies fossiles, mais qu'il a d'importants impacts notamment sur la qualité de l'air. Le progrès des technologies de combustion pourrait à l'avenir réduire ces impacts, mais probablement sans jamais les éliminer complètement. Le bilan des technologies à granulés souffre des impacts de l'étape de fabrication du combustible ; à mesure que la demande en granulés augmente, le bilan de l'ensemble de la filière bois-énergie pourrait donc empirer de manière significative.

Le calcul de l'impact du bois-énergie sur le changement climatique et la comparaison avec les technologies fossiles restent problématiques. Un changement de méthode de caractérisation des impacts peut changer radicalement les résultats et la hiérarchie des systèmes étudiés.

L'analyse ACV dynamique a montré que l'intensification de la sylviculture par raccourcissement des cycles de production a tendance à augmenter l'impact changement climatique de la forêt, par réduction du stock de carbone et diminution de la durée de vie moyenne des produits bois. L'augmentation de production résultant de cette intensification est insuffisante pour contrebalancer cet effet. Si la sylviculture doit s'intensifier à l'avenir, il devient important d'améliorer son bilan carbone, et notamment de lutter contre la perte de carbone du sol.

Cette analyse soulève également la question de l'échelle de temps considérée dans les analyses ACV. Par exemple, pour visualiser les différences entre les trois scénarios de hêtre étudiés, une période d'observation de 250 ans a été retenue, alors que l'horizon de temps d'une ACV classique dépasse rarement les 100 ans. On peut se poser la question de savoir si cette échelle de temps longue a vraiment un intérêt du point de vue des décideurs humains.

L'échelle spatiale de notre analyse est également limitée, et n'inclut pas d'aspects conséquentiels de l'intensification. La baisse de production de bois de charpente et d'ameublement devrait en effet entraîner une substitution par d'autres matériaux et donc une hausse des impacts d'autres acteurs du secteur de la construction [Profft et al., 2009; Sikkema et al., 2013]. Le passage à l'échelle mondiale, qui se justifie dans le cadre de politique climatique, ajoute un niveau de complexité à l'évaluation des impacts, car il faudra tenir compte de l'hétérogénéité des conditions de productions dans les différentes régions. L'augmentation de la demande en bois-énergie pourrait également rendre plus intéressantes des formes de culture très intensives comme les Taillis à Courte Rotation ou les herbes géantes comme le miscanthus.

La question des effets indirects, passant par les canaux prix et les marchés internationaux, doit aussi être prise en compte, en particulier en considérant que les forces de marché vont pousser la production de bioénergie dans les régions où les coûts de culture sont bas.

Il est, pour ces différentes raisons, nécessaire de mener une analyse économique permettant de localiser les productions et les filières utilisées.

Afin d'ouvrir une perspective plus large, le chapitre suivant est consacré à une analyse économique à l'échelle mondiale. Cette analyse considère uniquement un critère de coût de production minimum, et cherche à déterminer où et comment se ferait la production pour plusieurs niveaux de demande mondiale, en-dehors de toute autre considération. La première partie du travail consiste à déterminer les coûts de production de la biomasse en-dehors du coût de la terre. Ces coûts de production sont ensuite mis en place dans un modèle économique mondial centré sur l'usage des terres.

F. Analyse économique à l'échelle mondiale

Nous avons vu que la majorité des projections de potentiel à l'horizon 2050 ou 2100 s'appuient sur des cultures dédiées à croissance rapide et courtes rotations, comme le miscanthus, le panic raide (switchgrass) ou les taillis à courte rotation de peuplier et de saule (chapitre A - 6.2.1). Le développement de ces cultures va potentiellement 1) faire concurrence aux productions alimentaires et 2) générer des impacts liés au changement d'usage des sols direct et indirect. C'est pourquoi il est intéressant de considérer le développement potentiel de la biomasse-énergie à une échelle mondiale et d'observer l'évolution du coût de la terre associée.

L'objectif de ce chapitre est de construire des courbes d'offre de biomasse énergie, autrement dit des courbes présentant, pour un niveau de production donnée, le coût de production d'une unité de biomasse supplémentaire. Ces courbes d'offre d'énergie primaire seraient utilisées dans un modèle économique d'équilibre général (Imaclim [Hourcade et al., 2010]) pour calculer la production et la consommation finale de biomasse destinée à la production d'énergie. Ici nous nous concentrons sur l'offre de biomasse-énergie, via le modèle d'économie agricole Nexus Land-Use (NLU - [Souty et al., 2012]) ; la demande n'est considérée que sous la forme d'un objectif de production mondiale à atteindre.

La biomasse bois issue des plantations a un rendement à l'hectare relativement faible car les cycles de croissance sont longs ; il faut privilégier l'utilisation comme matériau de construction, d'ameublement etc. Aussi ce chapitre s'intéresse également aux Taillis à Courte Rotation et aux cultures énergétiques annuelles. Les résidus agricoles et forestiers sont aussi considérés. Les productions d'énergie sont rapportées en énergie primaire ; la conversion en chaleur, électricité, biocarburants n'est pas considérée pour l'instant.

Comme il a été montré dans le chapitre A - 6.2.1, le potentiel de production de bioénergie varie selon les conditions retenues. La détermination du potentiel économique à l'échelle mondiale demande trois catégories d'informations :

1) Les coûts de production et de récolte selon la biomasse et éventuellement le degré technologique (les coûts des carburants et des engrais rentrent en compte) ;
2) Les potentiels physiques de production : terres disponibles, rendements ;
3) Le coût de la terre, qui dépend de la rentabilité agricole et de la tension sur les terres disponibles.

Les coûts de production (1) sont déterminés par une revue de littérature, les points 2) et 3) par un modèle mondial d'usage des sols, décrit dans la section F - 2.1. On recherche une distribution simple des coûts de production ; une loi de distribution est établie à partir des données de la revue de littérature.

F - 1. Analyse statistique des coûts de production de la biomasse

F - 1.1. Frontières de l'analyse statistique

F - 1.1.1. Catégories de biomasse

Trois catégories de biomasse sont distinguées dans cette étude :

1. Les forêts et plantations sylvicoles ; les plantations ont pour but premier la production de bois d'œuvre (pin, chêne, hêtre) mais leurs coproduits peuvent être disponibles pour la production d'énergie ; les forêts gérées sont des forêts à régénération naturelle dans lesquelles on prélève l'excédent de production (nettoyage du sous-bois, récolte des arbres morts etc.).
2. Les taillis à courte rotation ou « short rotation coppice » (SRC) ; il s'agit d'espèces arborées à croissance rapide comme le saule, le peuplier, l'eucalyptus. La récolte s'effectue tous les trois à cinq ans selon l'espèce ; trois à cinq récoltes peuvent être faites avant de devoir replanter, pour des durées de rotation totales de 15 à 25 ans.
3. Les cultures énergétiques ou « energy crops » ; il s'agit de cultures semi-pérennes qui peuvent être exploitées avec les mêmes techniques et matériels que l'exploitation du foin et peuvent donner une à plusieurs récoltes par an, par exemple la luzerne, le miscanthus, le panic raide (« switchgrass »), le barbon de Gérard (« big bluestem »).

Après plantation, l'étape principale de production de la biomasse est la phase de récolte (en anglais *cutting*) et (pour les forêts) de débardage (*forwarding*) et de nettoyage des billons (*processing*). Les arbres et Taillis à Courte Rotation destinés à la production d'énergie à l'échelle industrielle sont ensuite broyés en plaquettes (étape de *chipping* ou *comminution*). Les coûts des différentes étapes ne sont pas toujours détaillés, ce qui rend parfois difficile l'interprétation de la dispersion des données. Le transport vers la centrale n'est pas inclus dans la revue de littérature car la variabilité des coûts est trop importante. Il est cependant pris en compte dans le modèle.

Les frais d'établissement et de maintien des peuplements (préparation du sol, fertilisation, désherbage etc.) sont ramenés à la quantité totale de biomasse produite sur toute la vie du

peuplement. Les coûts finaux sont donc des coûts moyens sur la vie du peuplement, et ne prennent pas en compte le pic d'investissement nécessaire. Prendre en compte le calendrier des coûts serait trop complexe à ce stade.

F - 1.1.2. Critères de recherche

La recherche a été effectuée sur le moteur de recherche Google® avec les mots clés suivants :

- « Forest harvest cost »
- « Forest harvest fuel cost »
- « SRC production cost »
- « Energy crops production cost »

Ont été privilégiés les articles publiés dans des revues scientifiques avec revue par les pairs, comme *Biomass Bioenergy*, *Applied Energy*, etc., ainsi que les publications techniques des associations de sylviculteurs et des établissements publics comme par exemple en France le Centre National de la Propriété Forestière et ses délégations régionales [CNPF, n.d.].

F - 1.1.3. Harmonisation des coûts

Les coûts considérés sont les coûts de production hors rente foncière (calculée ensuite dans le modèle économique). Pour permettre la comparaison des différents points de données, les coûts ont été ramenés en dollars américains de l'année 2005 par Giga Joule d'énergie primaire ($2005/GJ). Le déflateur utilisé est le Consumer Price Index publié par le Bureau of Labor Statistics américain (["Consumer Price Index (CPI)," n.d., "US Inflation Calculator," n.d.]).

F - 1.1.4. Extrait statistique des résultats

31 sources datant de 1997 à 2015 ont été exploitées pour un total de 119 points de données, essentiellement en Europe et aux Etats-Unis. Aucune donnée n'a pu être trouvée pour les régions Asie et Océanie.

Le Tableau 23 présente le résumé statistique de la revue de littérature ; les données complètes sont disponibles en Annexe VI. Les publications portant sur les cultures énergétiques et les taillis à courte rotation sont majoritairement basées sur des plantations pilotes, peu viables commercialement à l'heure actuelle. Les coûts de récolte de plantations ou de forêts gérées sont issus d'exploitations existantes. Les coûts de production peuvent varier sensiblement au sein d'une même étude en raison des différentes espèces, méthodes ou parcelles étudiées. Des exemples précis sont donnés plus loin pour chaque type de biomasse.

Tableau 23: Statistiques des valeurs issues de la revue de littérature sur les coûts de production de biomasse

Catégorie de biomasse	Nombre de points de donnée	Répartition géographique	Répartition des études dans le temps	Coût moyen	Coût médian	Dispersion
				($2005/GJ)		
Cultures énergétiques (Energy crops)	44	Europe (23) USA (21)	1993 - 2010	2,32	2,35	0,53 – 4,90
Taillis à courte rotation (TCR)	40	Europe (31) USA (5) Afrique (2) Brésil (1) Nicaragua (1)	1995 - 2015	3,05	2,85	0,84 – 6,20
Forêts et plantations	35	Europe (30) USA (3) Canada (2)	2001 - 2013	4,89	4,01	1,05 – 11,40

Les coûts médians vont croissant avec la pérennité des cultures ; cependant la dispersion des données entraîne beaucoup de chevauchement entre les trois plages de coûts. La Figure 54 présente la distribution des données pour les trois catégories de biomasse, sous la forme d'un graphique en « boîte à moustaches ». La valeur centrale est la médiane, les bords inférieur et supérieur des rectangles sont les 1er et 3ème quartiles, et les extrémités des moustaches sont les valeurs minimale et maximale.

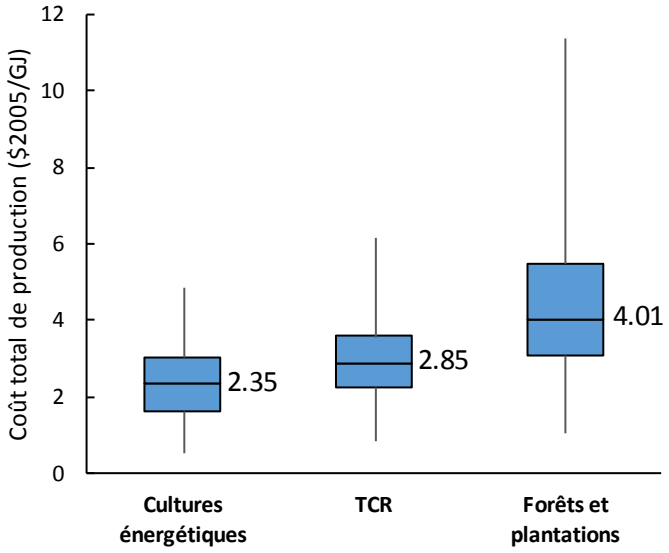


Figure 54: Comparaison des distributions de coûts pour les trois catégories de biomasse (graphique en box plot)

Les forêts présentent une plus forte dispersion des coûts que les taillis et les cultures énergétiques, alors que les points de données sont plus concentrés géographiquement et temporellement que pour les deux autres catégories. Cette dispersion sera étudiée plus en détail dans la suite du chapitre, mais on peut déjà supposer que les caractéristiques de chaque site de production, comme par exemple les conditions climatiques et pédologiques (pente, humidité du sol etc.), ont plus d'influence sur les coûts dans le cas des forêts que dans le cas des cultures dédiées. En effet, ces dernières sont des plantations contrôlées, avec moins de problèmes d'accès à la ressource que les forêts.

Il est intéressant de remarquer l'importance du rendement de production dans le coût final par unité d'énergie. Par exemple, les coûts de production à l'hectare sont comparables entre les plaquettes forestières chez [Kent et al., 2011] (787 $/ha) et les cultures énergétiques chez [Smeets et al., 2009] (754 $/GJ), mais ramenés à la quantité d'énergie produite, les plaquettes forestières coûtent plus du double des cultures énergétiques – 5.48 $/GJ contre 2.32 $/GJ. Ou encore, chez [Bauen et al., 2010], pour une même région (le Royaume-Uni), la production de miscanthus coûte 704 $/ha, les taillis à courte rotation de saule ou de peuplier 650 $/ha, mais les coûts au GJ sont respectivement de 16.9 et 19.8 $/GJ.

F - 1.1.5. Fonction de répartition des données

Pour chaque catégorie de biomasse, on cherche une fonction de répartition simple, la plus proche possible des données récoltées. Ceci a pour but de simplifier leur utilisation dans les courbes d'offre.

F - 1.2. Forêts / plantations

F - 1.2.1. Distribution du coût total de la biomasse

La Figure 55 présente la distribution des coûts totaux de production d'énergie à partir de la forêt. Cette distribution s'étend sur une large plage de coûts et est bimodale, ce qui pourrait signifier que l'échantillon manque de représentativité.

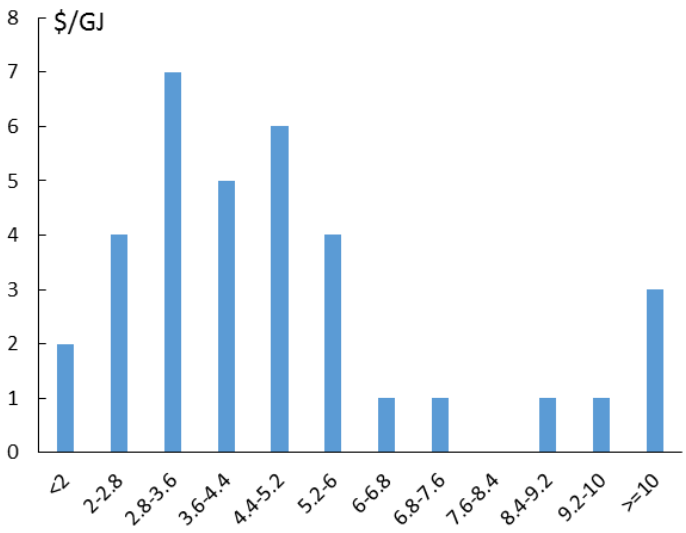


Figure 55: Coûts de production des forêts: répartition des données

Le coût de production des plaquettes de hêtre utilisé dans l'analyse technico-économique correspond à 7 €$_{2016}$/GJ, soit 6 $$_{2005}$/GJ. Ce coût se situe plutôt dans la tranche haute de l'échantillon. Ceci peut être dû au coût relativement élevé du travail.

F - 1.2.2. Répartition par étape de production et poste de coût

La Figure 56 présente la répartition des coûts de récolte et le poids de chaque étape dans ces coûts.

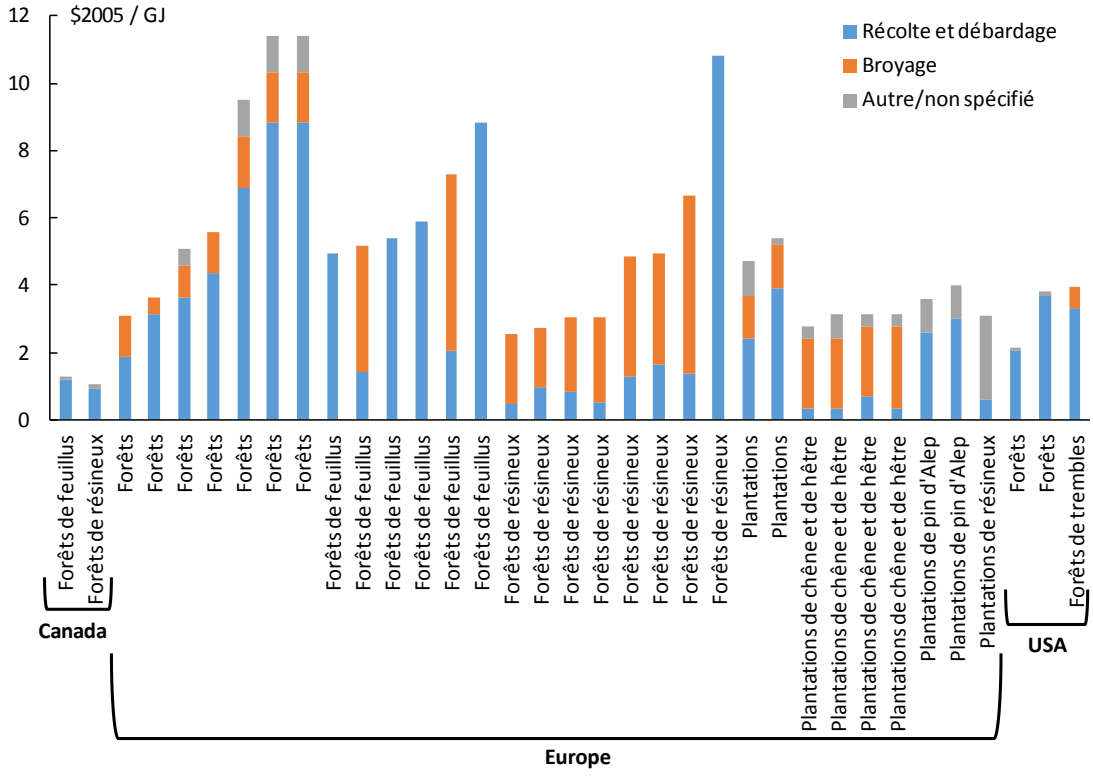


Figure 56: Coûts de production des forêts et plantations - répartition par étape de production

Comme on peut le constater, les variations de coûts sont essentiellement dues à l'étape de récolte et de débardage, dont les méthodes et les conditions peuvent varier grandement (densité de la forêt, pente du sol, distance à la route, matériel utilisé etc.). Le Tableau 24 présente des exemples de ces variations pour différents sites et méthodes de production dans une même étude [Kent et al., 2011]. Dans cette étude, les chercheurs ont testé plusieurs méthodes de récolte du bois sur différents sites. Les conditions pédologiques et climatiques des parcelles ont une forte influence sur le coût final, notamment parce qu'elles peuvent réduire fortement la gamme de techniques utilisables. Pour des raisons de pente et/ou de fragilité du sol, tous les sites ne sont pas accessibles aux machines lourdes. Lorsqu'ils le sont, en règle générale, l'augmentation de la mécanisation fait diminuer les coûts de production sur une même parcelle, mais d'un site à l'autre les variations de coûts sur une même méthode peuvent être importantes.

Tableau 24: Coûts de production de plaquettes forestières pour différents sites et méthodes [Kent et al., 2011]

Site	Dovea (feuillus)	Mullinavat (feuillus)	Abbeyfeale (résineux)	Bweeng (résineux)
Tronçonneuse + débardeur	4,95 $/GJ	8,84 $/GJ		
Tronçonneuse + broyage sur parcelle	2,05 $/GJ	1,43 $/GJ	2,53 $/GJ	4,85 $/GJ

La Figure 57 présente la décomposition des coûts de production entre capital et travail (main d'œuvre). Peu d'études effectuent cette distinction. En effet, les calculs sont faits à partir des rendements et des coûts horaires des équipements, y compris le personnel nécessaire à leur utilisation. Cependant, la méthode de récolte la plus répandue reste l'abattage à la tronçonneuse, ce qui demande une part importante de main d'œuvre qualifiée.

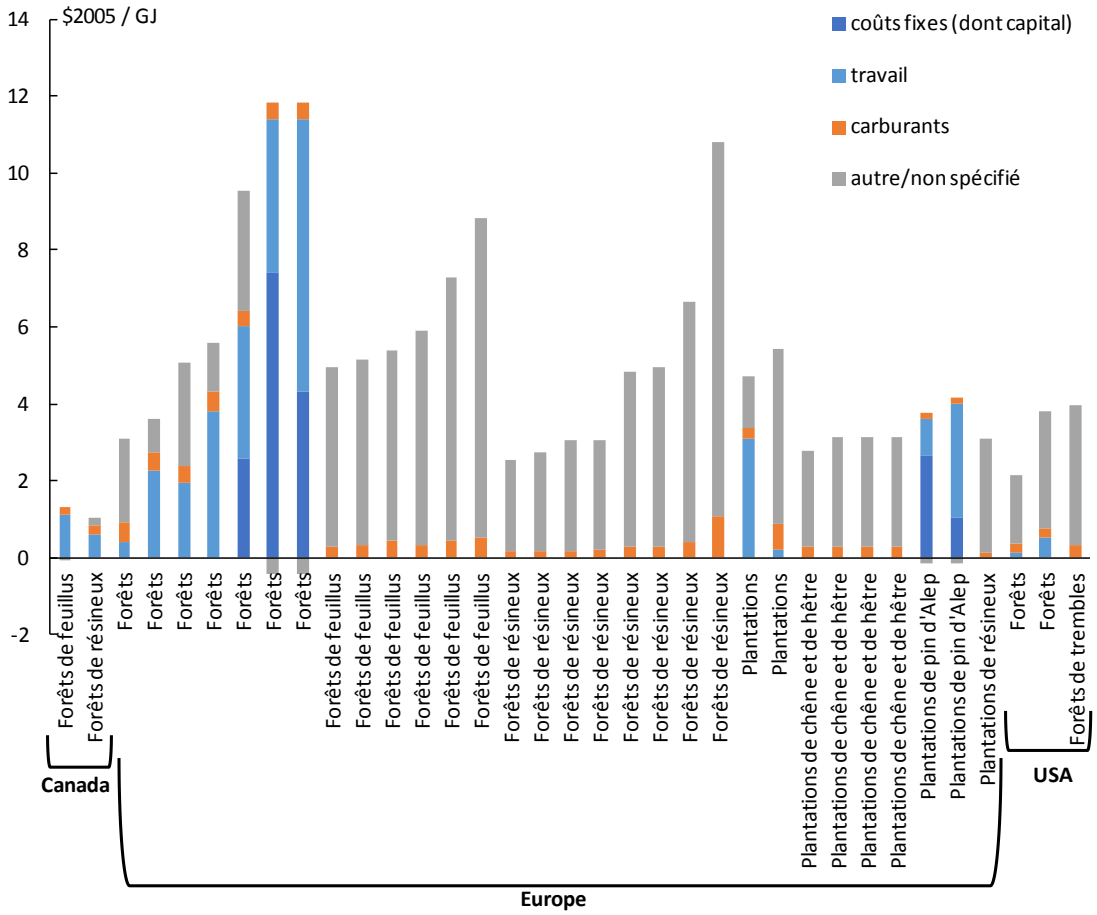


Figure 57: Coûts de production des forêts et plantations - répartition par poste

F - 1.2.3. Mise au point de la fonction de répartition des coûts de forêts pour intégration dans le modèle

On cherche à mettre au point une loi de répartition qui permette d'approcher au mieux les points de données disponible sur les coûts de la forêt. Pour cela, on utilise le test de Kolmogorov-Smirnov [Shorack & Wellner, 2009]. Ce test évalue l'adéquation entre une loi de répartition et un échantillon de données en calculant l'écart maximal entre la loi testée et la fonction de répartition empirique des données. Cet écart est appelé distance de Kolmogorov-Smirnov ; plus la distance est faible, meilleure est l'adéquation entre la loi et l'échantillon (détails Figure 58).

Les données disponibles sur la forêt correspondent à un coût total moyen de 4.89 $2005/GJ, et un écart-type de 2.69 $2005/GJ. On essaye d'approcher la distribution par une loi normale asymétrique tronquée. Le choix d'une loi normale est arbitraire ; il résulte d'une volonté de simplification de la distribution.

Soit g(x ; μ, σ, α) la densité de probabilité normale asymétrique définie selon l'équation (E5). Pour tout x tel que -∞<x<+∞,

$$g(x) = \frac{2}{\sigma} \times \varphi(\frac{x-\mu}{\sigma}) \times \Phi(\propto \frac{x-\mu}{\sigma})$$

(E5)

Où φ est la densité de probabilité de la loi normale standard, et ϕ sa fonction de répartition [Azzalini, 1985].

La loi tronquée f est telle que pour tout x<a ou x>b, f(x)=0 ; pour tout a≤x≤b, f(x)=

$$f(x) = \frac{2}{\sigma} \times \varphi(\frac{x-\mu}{\sigma}) \times \Phi(\propto \frac{x-\mu}{\sigma}) \times \frac{1}{B-A}$$

(E6)

Où A et B sont des estimations de la fonction de répartition en a et b respectivement de la distribution de densité de probabilité g.

$$A = \Phi\left(\frac{a-\mu}{\sigma}\right) - 2T\left(\frac{a-\mu}{\sigma}, \alpha\right)$$

$$B = \Phi\left(\frac{b-\mu}{\sigma}\right) - 2T(\frac{b-\mu}{\sigma}, \alpha)$$

(E7)

Où T(h, a) est la fonction T d'Owen [Owen, 1956], de forme

$$T(h,a) = \frac{1}{2\pi}\int_0^a \frac{e^{-\frac{1}{2}h^2(1+x^2)}}{1+x^2}dx$$

(E8)

A et B ont été estimés par intégration linéaire sur 100 points. La distance de Kolmogorov-Smirnov la plus faible, 0.101, est atteinte avec les paramètres suivants (Tableau 25) :

Tableau 25: Paramètres optimaux de la loi de distribution normale asymétrique tronquée

Symbole	Signification	Valeur
μ	moyenne	4,8864614
σ	écart-type	2,6934524
α	facteur de forme	-0,1
a	borne inférieure de la troncature	0
b	borne supérieure de la troncature	7,05
A	coefficients de normalisation de la loi tronquée	0,0409087
B		0,8120386

Néanmoins, fixer le coût minimum de production à 0$/GJ serait irréaliste et risquerait d'entraîner des résultats absurdes ; aussi il a été décidé de garder la borne inférieure de coût de la littérature, 1.05$/GJ. Avec cette borne fixée, la meilleure distance de Kolmogorov-Smirnov atteignable est 0.109. Elle est obtenue avec une borne supérieure à 8$/GJ ; les coefficients de normalisation A et B deviennent alors respectivement 0.0886347 et 0.8923796. La Figure 58 illustre le test de Kolmogorov-Smirnov avec ces nouveaux paramètres.

L'échantillon empirique est classé par ordre croissant de valeur, et chaque point se voit attribuer un indice i(x) de 1 à n (nombre total de points). La fonction de répartition empirique de chaque valeur x vaut i(x)/n. Le test de Kolmogorov-Smirnov calcule la distance maximale entre la fonction de répartition testée F(x), la fonction i(x)/n, et la fonction (i(x)-1)/n.

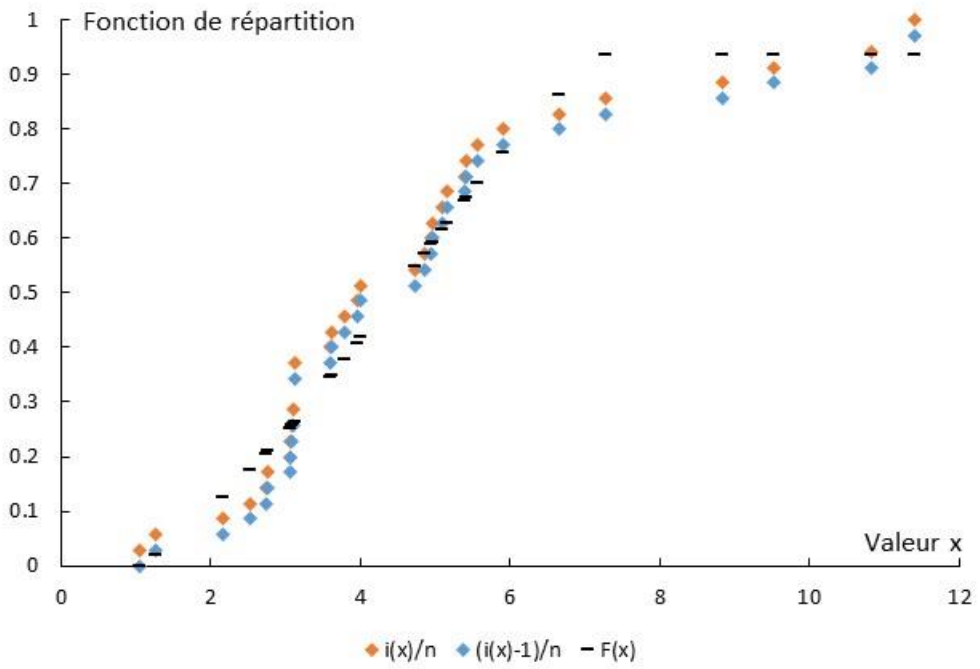


Figure 58: Illustration du test de Kolmogorov-Smirnov (D(F)=0.109)

La Figure 59 présente la distribution des données et la distribution de la loi retenue. Avec cette loi de répartition, la bimodalité des données est perdue ; il y a donc une perte d'information irréversible qu'il faudra garder à l'esprit dans l'interprétation des résultats.

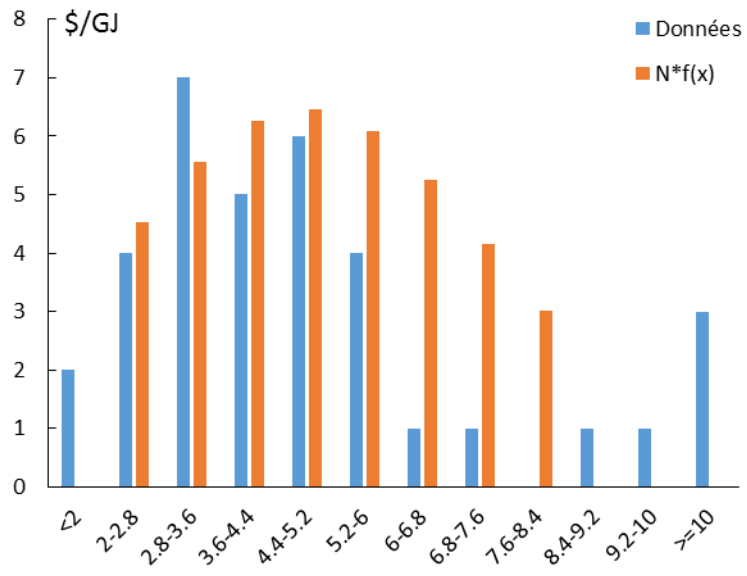


Figure 59: Coûts de production des forêts : distribution statistique des données et distribution retenue

F - 1.3. Taillis à Courte Rotation (TCR)

F - 1.3.1. Distribution du coût total de la biomasse

La Figure 60 présente la distribution des coûts de production des taillis à courte rotation. Elle est plus simple que celle des coûts de la forêt, et une loi normale basée sur sa moyenne et son écart-type correspond assez bien à l'échantillon, en dehors de quelques écarts.

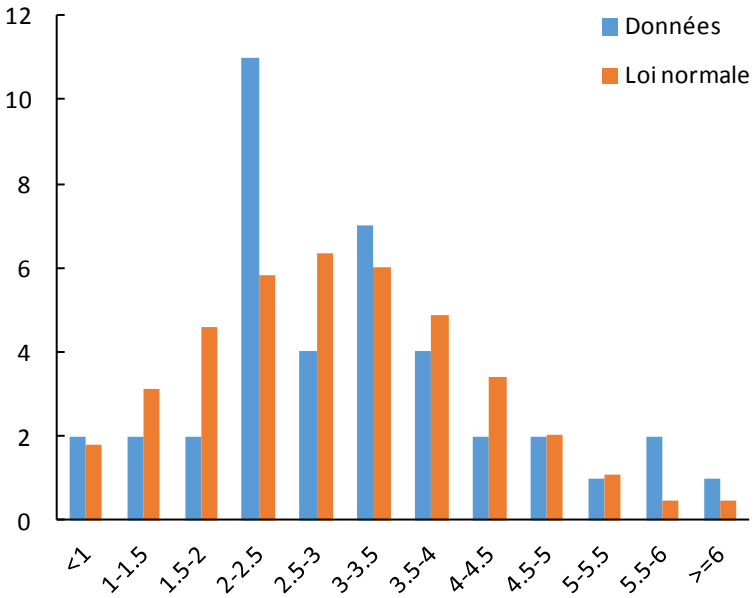


Figure 60: Coûts de production des Taillis à Courte Rotation : distribution statistique des données et loi normale

F - 1.3.2. Répartition par étape de production et poste de coût

La Figure 61 et la Figure 62 présentent la répartition des coûts par étape de production et par poste de coûts.

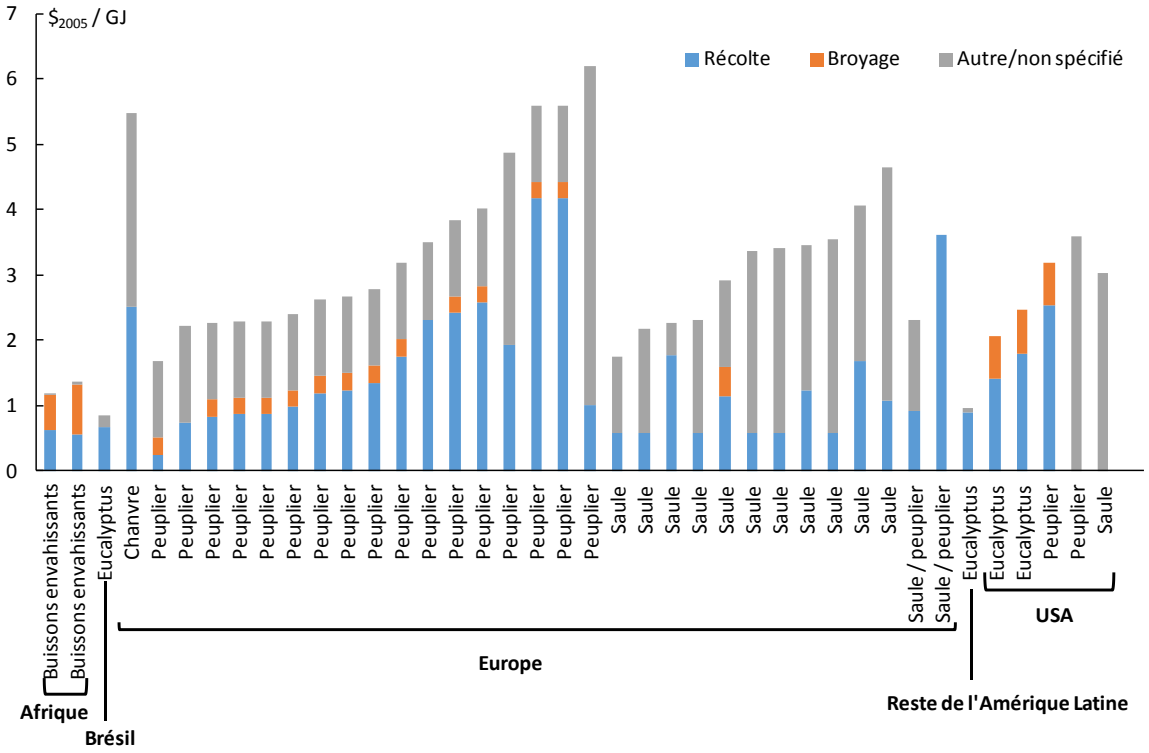


Figure 61: Coûts de production des Taillis à Courte Rotation - répartition par étape de production

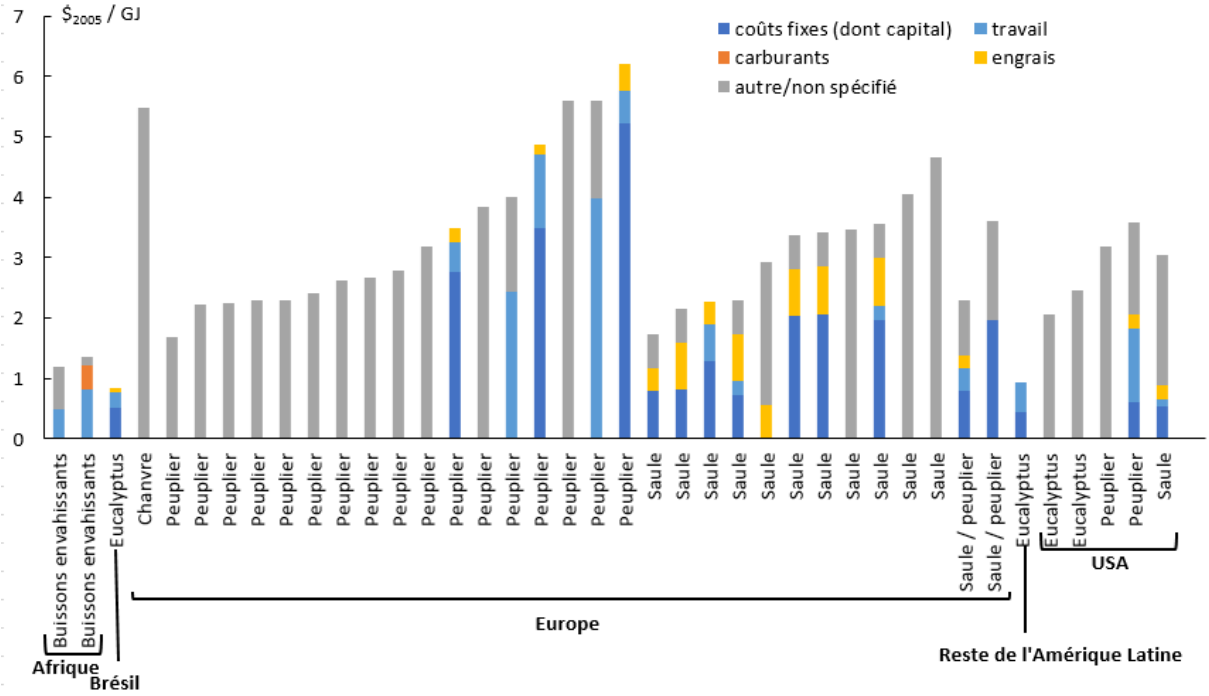


Figure 62: Coûts de production des Taillis à Courte Rotation - répartition par poste

Les coûts de fertilisants ne sont pas détaillés dans toutes les études, mais apparaissent non négligeables lorsqu'ils le sont, notamment dans les régions tempérées (entre 4 et 36% du coût total). Les frais d'établissement du peuplement constituent une part importante du coût total, de 17% [Dornburg et al., 2005] à 84% [Walsh, 1998]. Ils sont en moyenne plus élevés pour le peuplier que pour le saule.

Les différences dans le volume de travail et la quantité d'intrants nécessaires peuvent expliquer une partie des variations de coût. Par exemple, chez [de Wit et al., 2013], les frais de fertilisation et de désherbage sont de 146 €/ha/an pour le peuplier, pour un rendement de 14 tonnes/ha/an, contre 56 €/ha/an pour le saule, qui a un rendement de 10 tonnes/ha/an, soit presque un doublement des frais par tonne produite. Les clones de peuplier sont également plus chers à se procurer et à installer que les plants de saule (15.6 € par tonne récoltée pour le peuplier contre 4.4 pour le saule).

Très peu de données sont disponibles en dehors de l'Europe et des Etats-Unis, et les quelques points présents ont des coûts de production très faibles. Il s'agit de l'eucalyptus en Amérique Latine et de la récolte de buissons envahissants en Afrique. Ces derniers n'ont évidemment pas de coûts d'établissement, ce qui explique leur faible coût total.

F - 1.4. Cultures énergétiques annuelles

F - 1.4.1. Distribution du coût total de la biomasse

La Figure 63 présente la distribution des coûts de production des cultures énergétiques. La loi normale basée sur sa moyenne et son écart-type a une bonne correspondance, en dehors de quelques écarts.

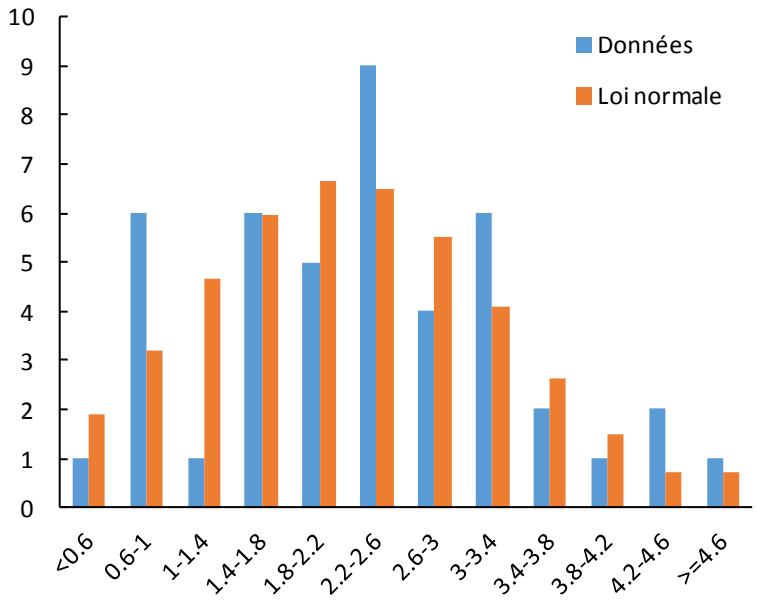


Figure 63: Coûts de production des cultures énergétiques : distribution statistique des données et loi normale

F - 1.4.2. Répartition par étape de production et par poste de coûts

La Figure 64 et la Figure 65 présentent la répartition des coûts par étape de production et par poste de coûts.

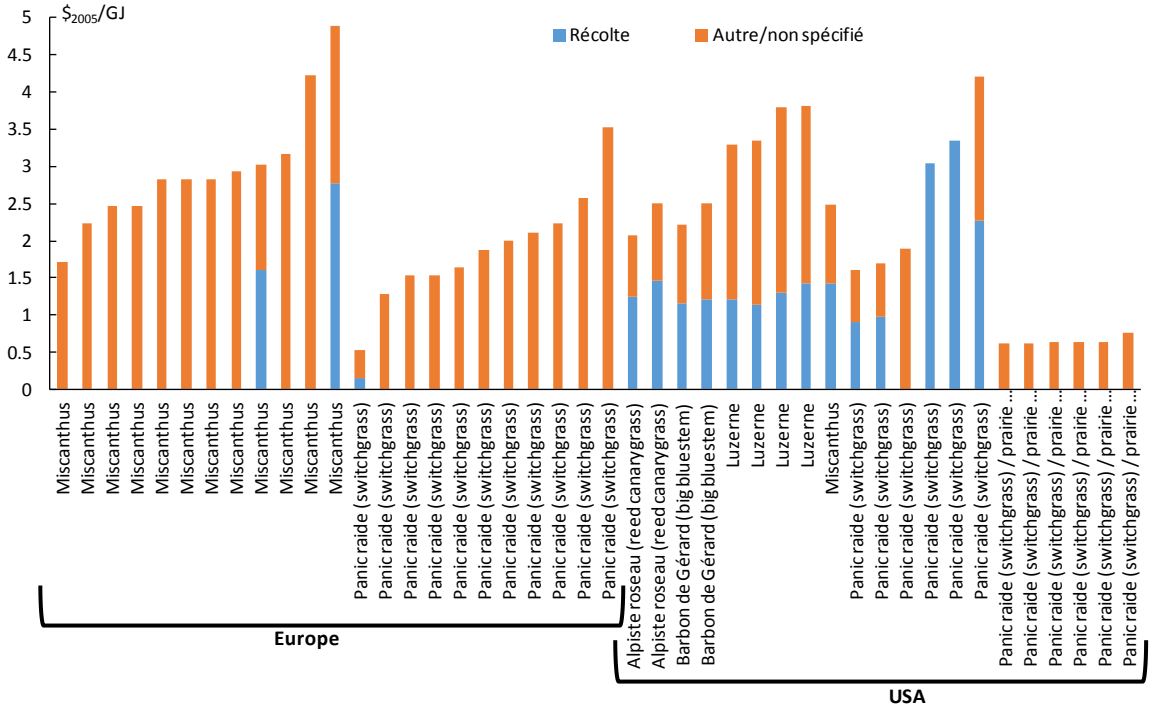


Figure 64: coûts de production des cultures énergétiques - répartition par étape de production

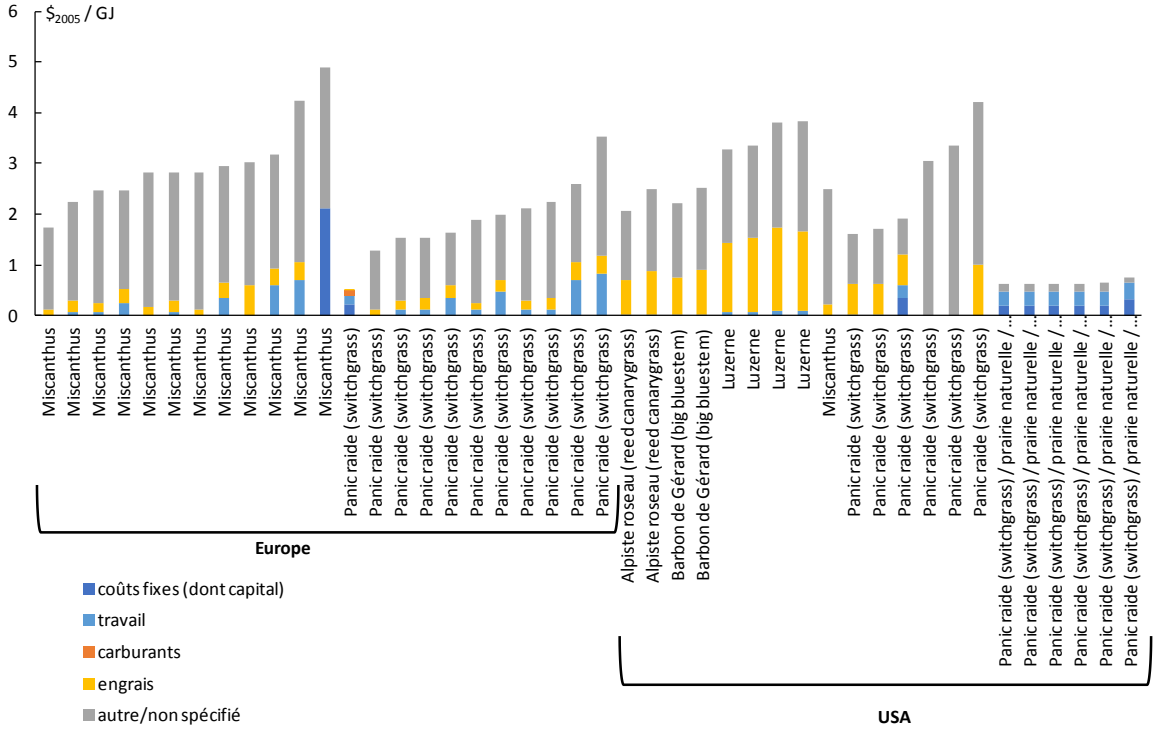


Figure 65: Coûts de production des cultures énergétiques - répartition par poste

Les coûts augmentent avec la quantité d'intrants apportée, ainsi qu'avec le coût du travail. L'exploitation des prairies naturelles est très peu coûteuse car aucun apport n'est considéré (cf. les six derniers points de l'ensemble USA). Les fertilisants, lorsqu'ils sont détaillés, représentent une part du coût total qui peut être importante (entre 4 et 43%). Par exemple, dans [Hallam et al., 2001a], ce sont les consommations d'engrais qui augmentent les coûts de la luzerne par rapport aux autres cultures.

F - 2. Modélisation économique

F - 2.1. Présentation du modèle NLU (Nexus Land-Use)

Ce chapitre vise à ouvrir une perspective plus large sur les aspects bioénergie, et permet de replacer nos précédentes analyses dans un contexte mondial. La production de bioénergie à grande échelle aura nécessairement des impacts sur le marché agricole, puisque cette production supplémentaire va mobiliser des ressources et des terres, alors même que la demande en nourriture humaine et animale continue d'augmenter. Plusieurs questions se posent : quel niveau de demande en bioénergie est-il théoriquement possible de satisfaire à l'échelle mondiale ? A quel coût cette énergie serait-t-elle produite ? Dans quelles régions et par quelle source de biomasse ? Quel effet aurait cette demande sur le prix des terres agricoles et par extension le marché des productions alimentaires ?

Pour apporter des éléments de réponse à ces questions, il est intéressant de comparer des scénarios à différents niveaux de demande en bioénergie. La tension sur les terres agricoles augmente naturellement avec la demande, on s'attend donc aussi à une augmentation des prix de la terre. Mais la rente foncière dépend également des rendements des productions mises en place. Si la production de bioénergie est plus intéressante financièrement que les systèmes agricoles existants, ceux-ci pourraient perdre de la valeur.

Une autre question intéressante concerne l'effet qu'aurait l'introduction d'une taxe carbone sur la production de bioénergie. Les TCR et cultures énergétiques nécessitent un certain niveau de fertilisation, et verraient donc leurs coûts augmenter avec la taxe carbone, contrairement aux forêts. Selon les coûts de production respectifs de la forêt et des cultures, et si le niveau de taxe est suffisant, il pourrait y avoir une inversion des préférences d'exploitation.

F - 2.1.1. Structure et fonctionnement du modèle

Le modèle Nexus Land-Use est un modèle mondial d'agriculture développé par le CIRED [Souty et al., 2012]. La Figure 66 présente le principe du modèle. Il calcule, en fonction des demandes en nourriture et en bioénergie et des rendements de production des différents systèmes agricoles, les surfaces cultivées et occupées par les différentes productions (alimentation humaine, alimentation animale, élevage intensif/extensif, bioénergie, forêts).

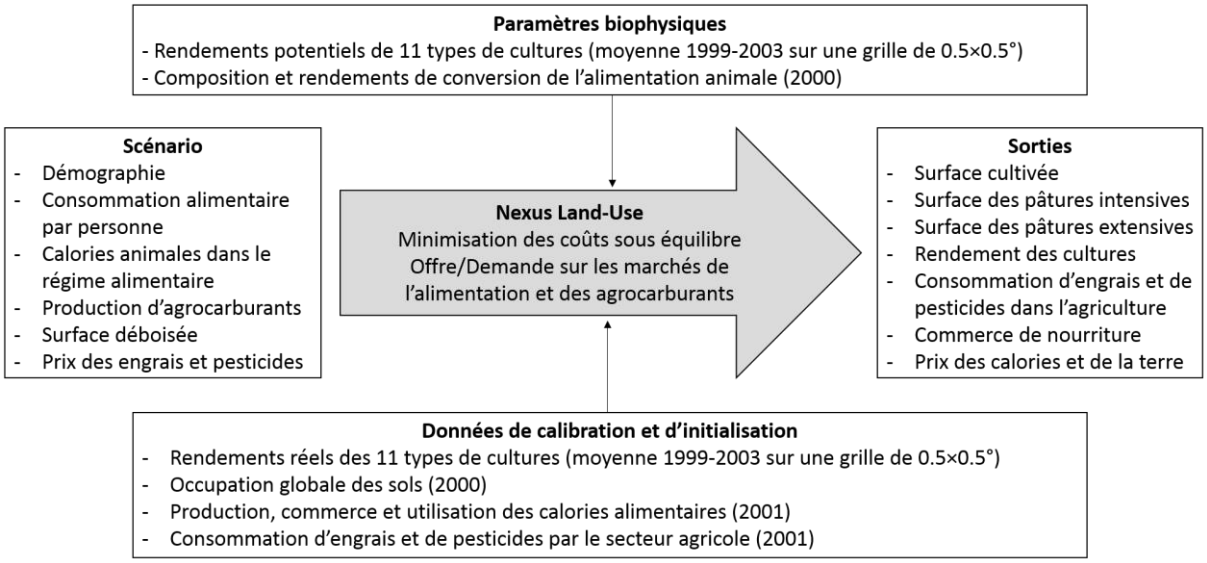


Figure 66: Schéma de principe du Nexus Land-Use

Concernant la bioénergie, le modèle considère trois sources de biomasse : les forêts gérées, les cultures dédiées (SRC, energy crops) et les résidus agricoles et forestiers. L'allocation entre les trois catégories se fait sur la base de la minimisation de coûts (§ F - 2.1.5). Les quantités disponibles de résidus agricoles sont calculées de manière endogène par le modèle. Pour les résidus forestiers, le potentiel suit un scénario exogène basé sur les travaux de [Smeets et al., 2007].

F - 2.1.2. Scénarios globaux

La demande en bioénergie peut suivre un scénario exogène ou être fournie par le modèle d'équilibre mondial IMACLIM-R [Hourcade et al., 2010]. Les productions sont calculées en énergie primaire; la forme d'énergie demandée (chaleur, électricité, etc.) n'est pas considérée. A cette échelle, il est en effet difficile de décrire en détail les bilans matière et énergie ou de faire des inventaires précis, comme on pouvait le faire au chapitre C - 3 pour la filière bois au niveau des régions françaises. La Figure 67 présente le scénario démographique et alimentaire utilisé. Il s'agit du SSP2, l'un des nouveaux scénarios étudiés par le GIEC (Shared Socio-economic Pathways, Trajectoires socio-économiques communes [van Vuuren et al., 2012]).

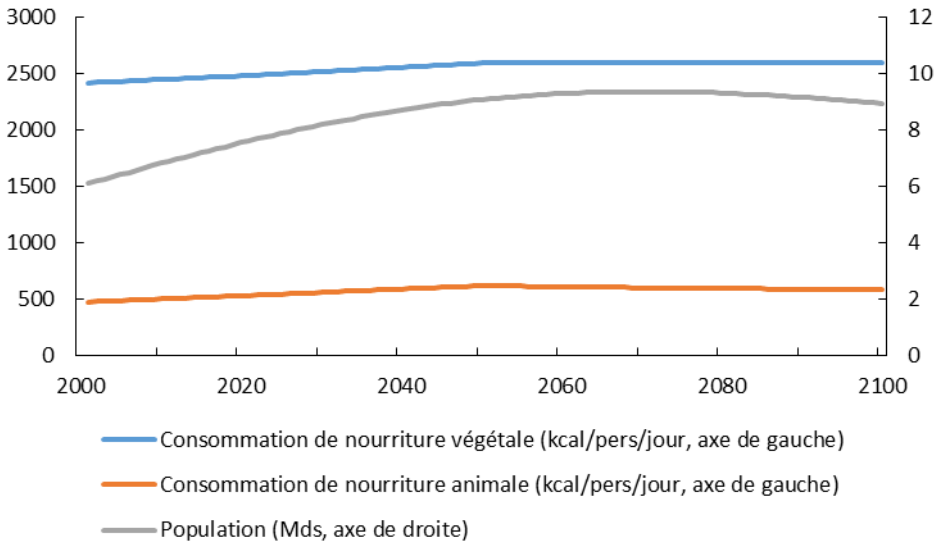


Figure 67: Scénario démographique et alimentaire à l'horizon 2100

Le scénario SSP2 correspond à une poursuite des tendances actuelles en termes d'évolutions socio-économiques. Il prévoit un pic de population à 9.36 milliards d'individus en 2070, puis un déclin pour atteindre 8.94 milliards en 2100 [Kc & Lutz, 2014]. Le régime alimentaire moyen devient plus riche en protéines animales, avec une augmentation de la consommation annuelle par personne de 23% ; parallèlement, la consommation annuelle par personne de nourriture végétale augmente de 7% entre 2000 et 2100 [Alexandratos & Bruinsma, 2012].

La Figure 68 présente le profil de taxe carbone retenu pour la comparaison de scénarios avec et sans taxe. La taxe est introduite en 2020 à 20$ par tonne de CO_2, puis augmente exponentiellement au rythme de 3% par an.

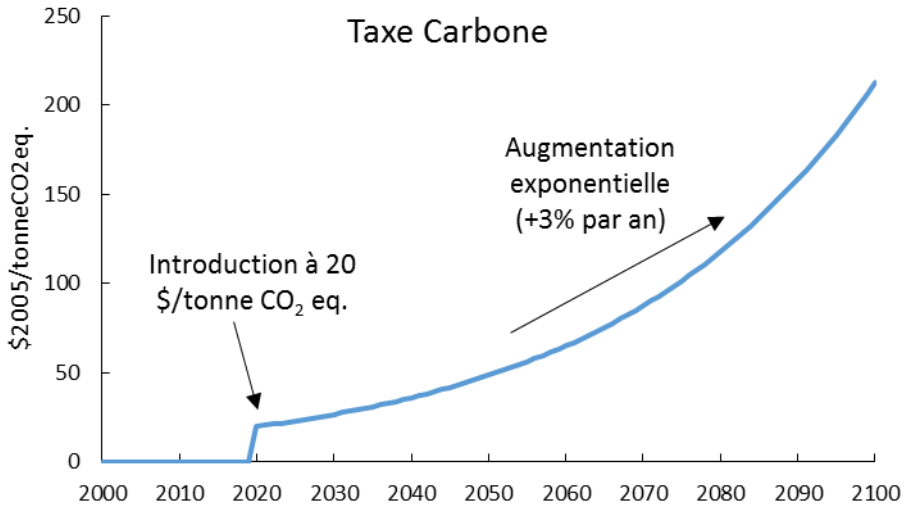


Figure 68: Profil de la taxe carbone, lorsqu'elle est appliquée

Les scénarios comparés ici le seront à l'horizon 2050 ; ils sont régis par une demande exogène en biomasse-énergie de 50, 100, ou 150 EJ en 2050 (progression linéaire entre 2005 et 2050). Ces trois objectifs de production correspondent à des projections à consensus fort, moyen et faible dans la littérature (Figure 23). Deux versions sont testées pour chaque demande, avec et sans taxe carbone.

F - 2.1.3. Régionalisation

Le globe est divisé en douze grandes régions économiques, présentées Figure 69.

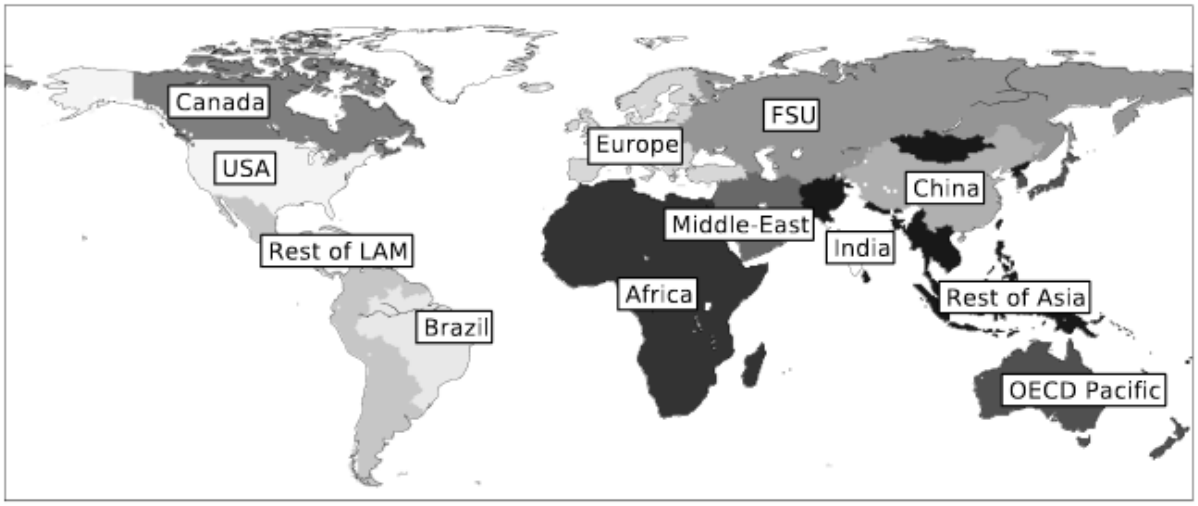


Figure 69: Les 12 régions du Nexus Land-Use (Rest of LAM : Amérique Latine hors Brésil; Brazil : Brésil; FSU : ancien bloc soviétique; Middle-East : Moyen-Orient ; Africa : Afrique ; India : Inde ; China : Chine ; Rest of Asia : Asie hors Chine et Inde ; OECD Pacific : Australie, Nouvelle-Zélande)

La production est allouée aux régions et aux différentes formes de biomasse par minimisation du coût final, et donc est faite en priorité dans les régions aux coûts de production les plus faibles. Ce n'est donc pas une prédiction du développement des bioénergies, mais simplement une réponse à la question « Où se ferait la production si les seuls éléments considérés étaient les coûts et les potentiels de production ? ». Dans cette optique, la demande n'est pas régionalisée ; le commerce de la biomasse-énergie et donc les coûts de transport entre les régions ne sont pas pris en compte. Le marché de la bioénergie est considéré comme totalement flexible. En revanche, celui des biens alimentaires ne l'est pas : une partie de la demande est toujours assurée localement, et donc mobilise des terres.

La régionalisation de la demande et donc le calcul des coûts de transport nécessiteraient la connexion à un modèle d'équilibre général pour gérer le commerce. Les coûts de transport seraient alors sûrement non négligeables. Par exemple, dans [Hoefnagels et al., 2014], les coûts de transport reviennent à 30% des coûts de la biomasse livrée. Le couplage à un modèle général permet de répondre à d'autres questions que le seul modèle Nexus Land Use, et sera effectué dans de futurs travaux du CIRED.

F - 2.1.4. Distribution de rendements

Le modèle distingue des classes de fertilité des terres agricoles ; elles sont caractérisées par leur rendement potentiel en calories par hectare et par an. La distribution des rendements entre et au sein des régions du monde est calquée sur la distribution des rendements des cultures donnée par le modèle dynamique de végétation mondiale LPJml [Bondeau et al., 2007]. Cette distribution est présentée en Figure 70.

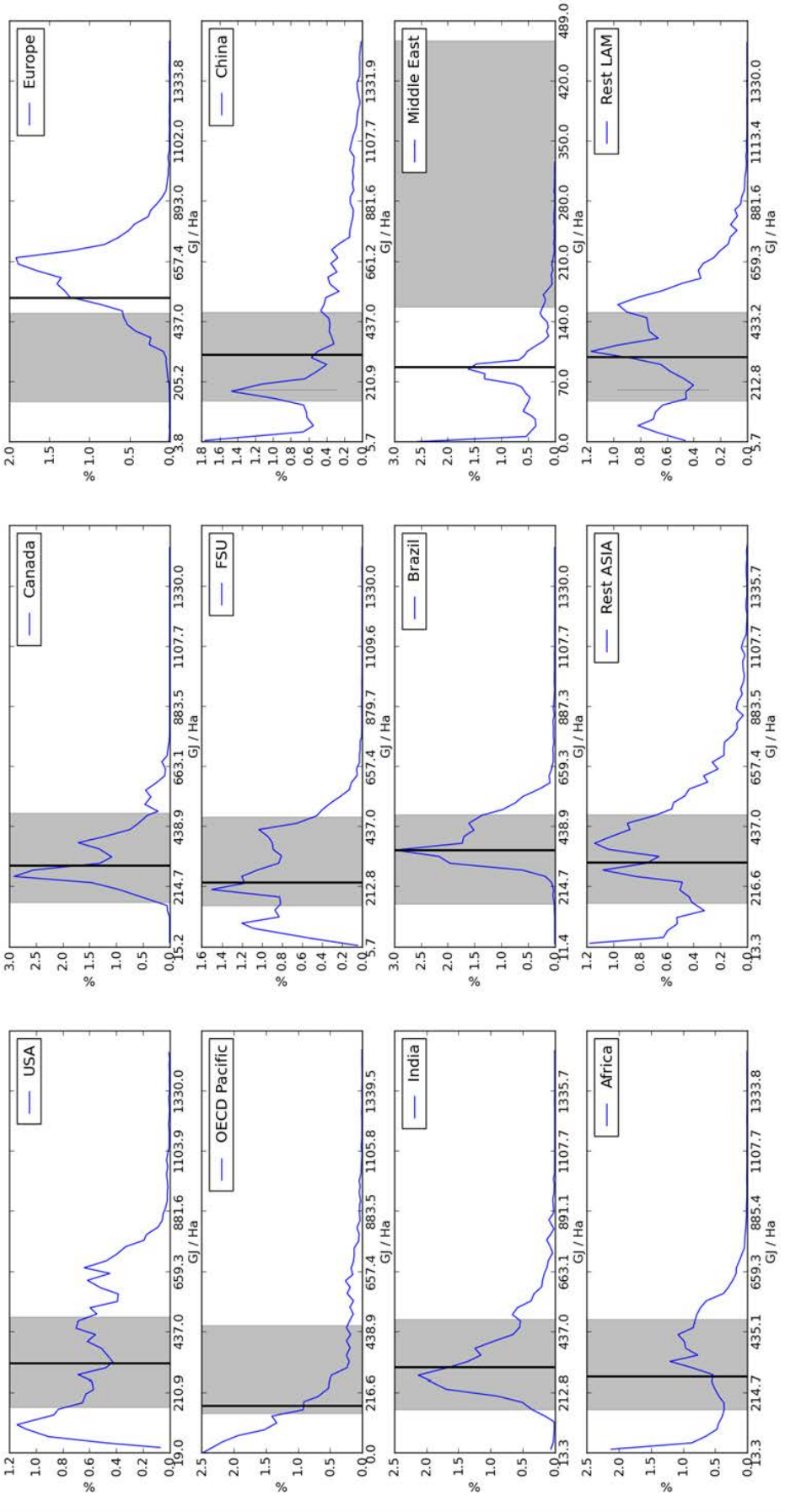


Figure 70: Distribution des rendements de terres dans les 12 régions du modèle NLU [Souty et al., 2012]

Sur chaque graphique, la ligne noire représente le rendement moyen pour la région, et la zone grisée les rendements moyens globaux qui peuvent être justifiés selon la revue de littérature de Creutzig *et al.* (2015) [Creutzig et al., 2015]. Pour la majorité des régions, le rendement moyen régional tombe dans la zone grise. Les exceptions à cette règle sont le Moyen-Orient, qui souffre de terres pauvres et d'un manque d'eau, et l'Europe, qui bénéficie de terres de qualité élevée.

Les cultures non énergétiques et la production de bioénergie de 1ère génération suivent les rendements endogènes au modèle ; le rendement maximal des cultures ligno-cellulosiques est exogène, il est égal en moyenne mondiale à 12 tonnes/ha/an en 2010 et monte à 16 tonnes/ha/an en 2050, basé sur la littérature et des dires d'experts [Creutzig et al., 2015]. Cette approche est retenue parce que l'effet de la qualité des sols sur les rendements des cultures ligno-cellulosiques est encore mal documenté ; cependant le rendement est supposé s'améliorer avec l'expérience.

F - 2.1.5. Allocation de terres et rente foncière

Les terres disponibles sont allouées prioritairement à la production de nourriture et à l'élevage. Les résidus agricoles et forestiers disponibles sont comptabilisés. Ensuite, la répartition de la production entre régions et entre sources de biomasse (forêts ou cultures dédiées) se fait en trois étapes :

1. Les courbes d'offre des forêts et des cultures sont tracées pour chaque région à partir de (a) les coûts de production issus de la littérature, et (b) le coût de la terre issu du modèle, pour les cultures dédiées uniquement ;
2. La courbe d'offre agrégée pour chaque région est déterminée ;
3. L'arbitrage entre les régions se fait sur la base de la minimisation des coûts ; dans chaque région, la répartition de la production et le coût de la biomasse sont déterminés.

Ces trois étapes sont présentées plus en détails dans les paragraphes suivants.

F - 2.1.5.1. Courbes d'offre régionales pour les forêts et les cultures dédiées

Les courbes d'offre sont calculées de manière légèrement différente pour les forêts et pour les cultures dédiées. Les surfaces de forêts sont fixes, et c'est leur degré d'exploitation qui varie ; aucun coût de la terre n'est considéré. Les cultures dédiées entrent en concurrence avec d'autres usages agricoles, on prend donc en compte le prix de la terre en plus des coûts de production.

Les surfaces de forêts existantes, et donc potentiellement exploitables, dépendent du scénario de déforestation retenu. Les rendements sont entre 5 et 9 EJ/an en fonction de la fertilité des terres. Les forêts ne sont pas fertilisées. Leur exploitation totale est limitée à 75 EJ/an ; ces 75 EJ comprennent l'usage dit « traditionnel » des forêts, qui correspond à l'utilisation par les populations locales pour le chauffage et la cuisine. Les coûts de production de la biomasse issue des forêts suivent la courbe de distribution établie précédemment ; la même distribution est considérée dans toutes les régions, ce qui suppose que les différences régionales sont de 2nd ordre par rapport aux facteurs techniques expliquant la dispersion des coûts. S'y ajoutent les coûts de transport de la parcelle au dépôt, issus de [Laitila, 2008].

Pour les TCR et cultures énergétiques, les coûts de production varient selon la région. Si des données sont disponibles, le coût retenu est la médiane de celles-ci ; la dispersion des coûts est suffisamment faible pour justifier cette approximation. On préfère la médiane à la moyenne, qui peut être tirée vers le haut ou vers le bas par des points extrêmes. Sinon, les coûts sont répartis en fonction du PIB par population, et sont compris entre le maximum et le minimum observés dans la revue de littérature.

Le Tableau 26 présente les coûts de production retenus pour chaque région. Les régions pour lesquelles aucune donnée n'est disponible sont rattachées à celle au plus proche PIB par habitant ; le coût retenu est celui de la région de référence corrigé proportionnellement au PIB par habitant. Pour l'Inde, le coût ainsi calculé est inférieur au coût minimum observé dans la littérature, aussi on retient ce coût minimum observé.

Tableau 26: Coût de production des TCR retenu pour chaque région du NLU

Région	Coût de production médian des TCR d'après la revue de littérature ($/GJ)	Régions dérivées	PIB par habitant (1.000 $$_{2001}$ / habitant)	Coût de production des TCR retenu ($/GJ)
USA	2,83	USA	44,7	2,83
		Canada	41,9	2,64*
		OCDE Pacifique	38,9	2,47*
Europe	3,19	Europe	23,3	3,19
Brésil	1,11	Brésil	4,38	1,11
		Ex-URSS	5,52	1,41*
Afrique	1,49 (avec des frais d'établissement de 20%)	Afrique	1,40	1,49
		Chine	2,58	2,75*
		Inde	0,600	1,11**
		Reste de l'Asie	2,52	2,69*
Amérique Latine hors Brésil	1,21	Amérique Latine hors Brésil	7,88	1,21
		Moyen-Orient	12,4	1,91*

*Coûts ramenés au PIB par habitant par rapport à la région de référence
**Coût minimum observé dans la revue de littérature, pris comme coût plancher

Cette correction des coûts vis-à-vis du PIB par habitant devrait normalement s'effectuer uniquement sur le coût du travail, le coût du capital étant relativement homogène entre les régions. Cependant, trop peu de données sont disponibles sur la division des coûts entre capital et travail pour effectuer cette distinction de manière fiable. C'est pourquoi cette hypothèse simplificatrice est émise.

Les coûts de transport du champ au dépôt sont tirés de [Hoogwijk et al., 2009] Les Etats-Unis et l'Europe produisent exclusivement des cultures énergétiques car leur coût de production est plus faible que celui des TCR (2.46 $/GJ et 1.97 $/GJ contre 2.83 et 3.19 $/GJ respectivement). Les autres régions produisent exclusivement des TCR. Les cultures énergétiques sont fertilisées au même niveau (par hectare) que la production de foin. Les TCR reçoivent moitié moins de fertilisants.

Le coût de la terre, ou rente foncière, est établi en fonction de la demande et de la disponibilité des terres, pour chaque usage agricole (cultures de céréales, cultures maraîchères, élevage intensif, élevage extensif, alimentation animale etc.). La Figure 71 présente les deux composantes de la rente pour les cultures : la rente différentielle et la rente de rareté.

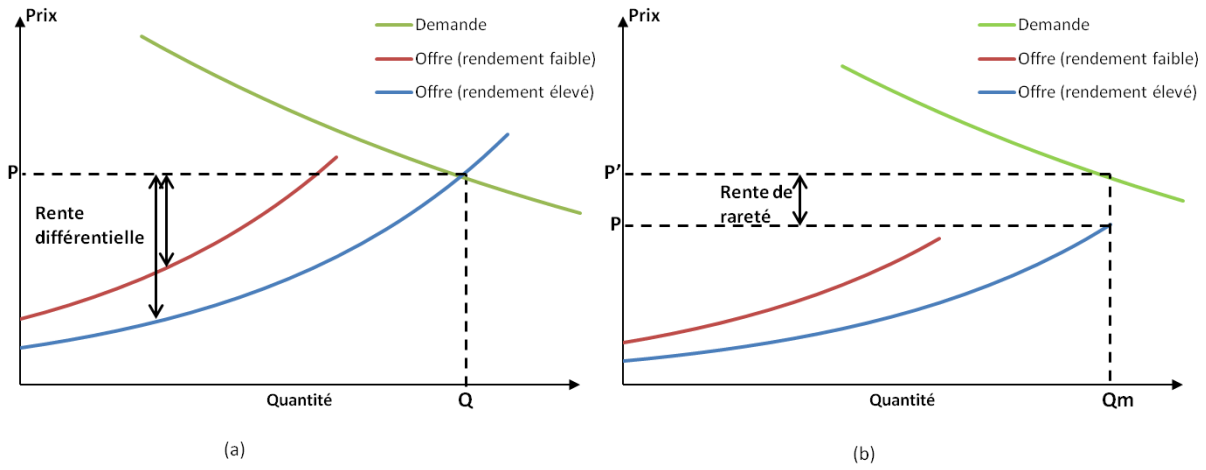


Figure 71: Rente différentielle (a) et rente de rareté (b)

La rente différentielle correspond à la différence entre le prix de marché et le coût de production. Le prix de marché est fixé par l'intersection (P, Q) entre la courbe de demande et la courbe d'offre des premières terres utilisées, soit les plus fertiles ; le même prix s'applique aux terres utilisées ensuite, mais leurs coûts de production par quantité produite sont plus élevés en raison de leur plus faible rendement à l'hectare ; donc la rente différentielle diminue (Figure 71, a). La rente de rareté correspond à une situation où la demande est supérieure à l'offre disponible : il s'agit de la différence entre le prix de marché (P') et le coût de production de l'offre maximale (P). Elle est identique quelle que soit la classe de fertilité des terres considérées (Figure 71, b).

La rente retenue pour la production de bioénergie est celle des cultures. Il y a donc implicitement une compétition entre la bioénergie et les cultures alimentaires. On suppose cependant que les terres mobilisées pour la production de bioénergie sont des pâtures extensives. Il s'agit de terres qui ne sont pas actuellement cultivées pour des raisons diverses (accessibilité, propriété foncière, etc.), mais que l'on considère comme utilisables dans le cadre d'une politique de production de bioénergie. La surface totale de terres disponibles est estimée à 1,9 milliards d'hectares. La conversion de ces pâtures en cultures de bioénergie entraîne des coûts, qui ne sont pas actuellement représentés dans le modèle, mais qu'il faudrait intégrer pour des analyses futures, plus poussées. L'estimation de ces coûts sera difficile, en raison de la variété des situations possibles (lois foncières, problèmes d'accessibilité, etc.). La production commence par les terres les plus fertiles disponibles, et s'étend sur les autres classes de terre au besoin. La perte des prairies d'élevage extensif mobilisées est compensée par une intensification de l'élevage, via la conversion d'autres prairies extensives en prairies intensives. Ainsi, la demande en calories d'origine animale fixée par le scénario peut être satisfaite.

F - 2.1.5.2. Courbes d'offre régionales agrégées

La Figure 72 présente un exemple de calcul d'une courbe d'offre régionale agrégée, dans un cas où les cultures dédiées sont initialement plus chères que l'exploitation des forêts, mais deviennent compétitives ensuite. A chaque augmentation de la quantité produite, une comparaison des prix s'effectue. Les cultures ne sont pas utilisées tant qu'il reste moins coûteux d'augmenter la production des forêts (déplacement sur la courbe rouge) que de commencer des cultures dédiées (passage à la courbe bleue). Le point d'inversion des coûts correspond donc au moment où le premier GigaJoule de cultures dédiées est moins cher à produire que le prochain GigaJoule de forêts.

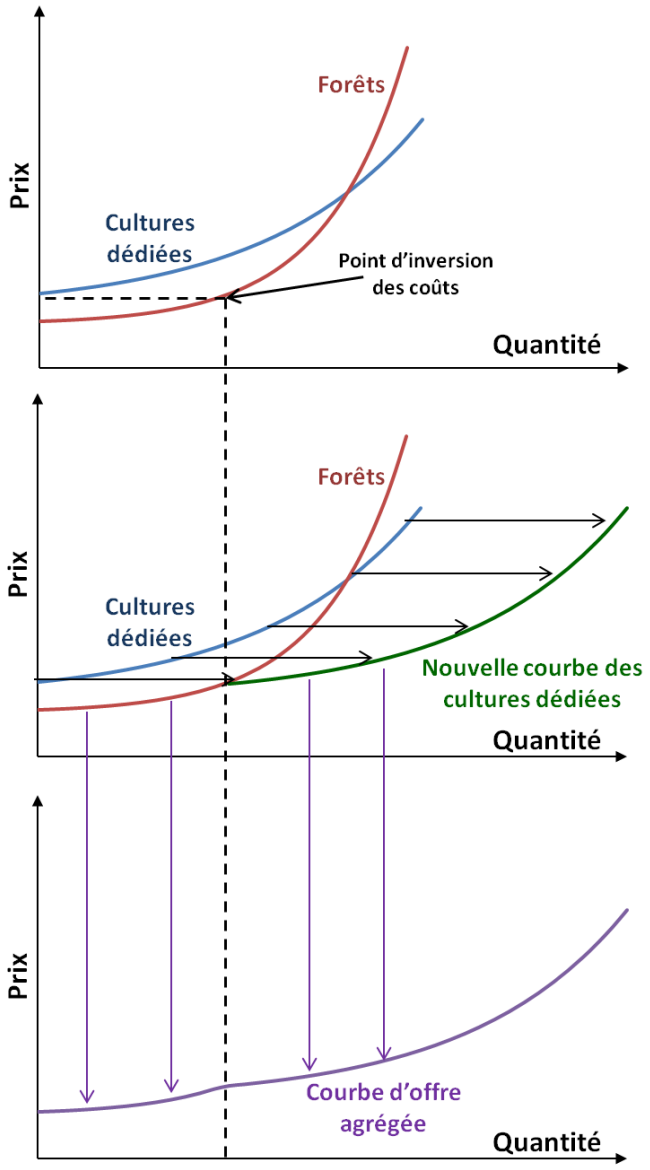


Figure 72: Calcul des courbes d'offre régionales agrégées

La courbe d'offre agrégée correspond au prix minimum disponible pour la production de biomasse dans la région. Dans ce cas théorique, le début de la courbe correspond à la courbe d'offre des forêts, et la fin à celle des cultures dédiées. Dans un cas réel, il est possible que la hiérarchie des coûts entre forêts et cultures ne s'inverse jamais (l'une des deux sources est systématiquement plus chère), auquel cas la courbe agrégée correspondrait à la courbe d'offre la moins chère des deux.

F - 2.1.5.3. Répartition de la production entre régions et sources de biomasse

Une fois la courbe d'offre agrégée calculée pour chaque région, le modèle peut calculer de la même façon la courbe d'offre mondiale ; en fonction du niveau de la demande, la production est divisée entre les différentes régions, puis est déterminée la répartition entre forêts et cultures pour chaque région, à partir de la courbe agrégée.

La Figure 73 présente la répartition de la production régionale entre forêts et cultures, dans le même cas théorique que précédemment.

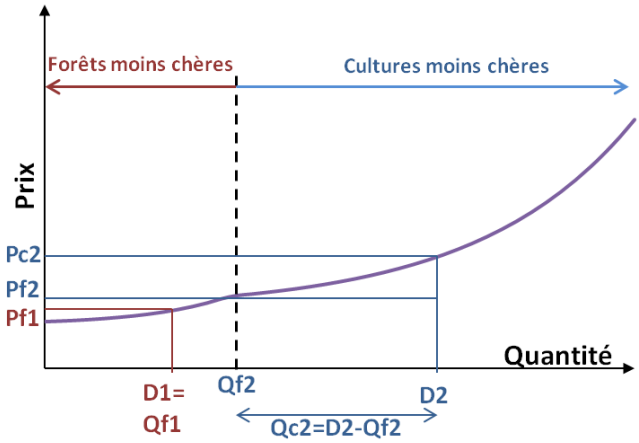


Figure 73: Répartition de la production régionale entre forêts et cultures dédiées en fonction de la demande

Si la demande de production est inférieure au seuil d'inversion des coûts entre forêts et cultures, la demande (D1) est entièrement couverte par les forêts, à un coût maximal Pf1 ; les cultures ne sont pas utilisées. Sinon, les forêts produisent à hauteur du seuil (Qf2), et la demande résiduelle Qc2 est couverte par les cultures dédiées, installées sur les pâtures disponibles. Le prix maximal des forêts est le prix au niveau du seuil d'inversion (Pf2), et celui des cultures dépend du niveau de demande (Pc2).

F - 2.2. Résultats

F - 2.2.1. Courbes d'offre de la biomasse-énergie

Les courbes d'offre représentent les quantités de bioénergie que les régions sont prêtes à produire pour un prix donné. L'offre est représentée sur l'axe des abscisses, et le prix sur l'axe des ordonnées. Le prix du marché est obtenu en croisant ces courbes avec des courbes de demande. Elles sont déterminées en fonction des coûts de récolte (issus de la revue de littérature), des coûts de fertilisation s'ils existent et, pour les TCR et cultures énergétiques, du coût de la terre.

La Figure 74 présente les courbes d'offre des forêts gérées en 2050, en présence d'une taxe carbone à 48$ par tonne de CO_2. Les coûts de production sont répartis sur les surfaces de forêts dans chaque région, suivant la loi normale asymétrique tronquée établie au paragraphe F - 1.2. Le Moyen-Orient et l'Inde, et dans une moindre mesure la Chine et le reste de l'Asie, présentent un potentiel de production faible, car ces régions disposent de moins de surfaces de forêts, et des coûts élevés. A l'autre bout du spectre on trouve l'ex-URSS, l'Afrique et le Canada, avec un fort potentiel et des coûts de production faibles, grâce à de grandes surfaces disponibles.

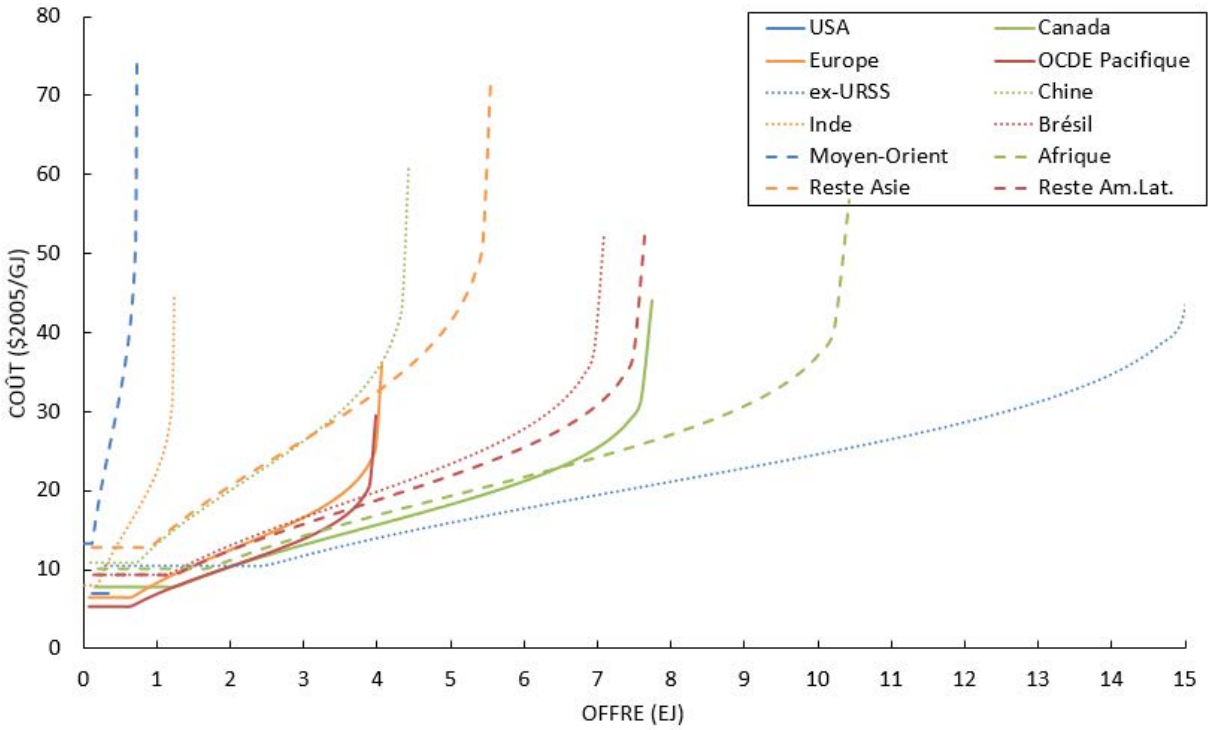


Figure 74: Courbe d'offre des forêts gérées en 2050, en présence d'une taxe carbone à 48$/tonne$CO_2$eq.

Les courbes d'offre des TCR et des forêts sont comparées par région dans la Figure 75. Dans la majorité des régions, le potentiel de production des TCR est beaucoup plus important que celui des forêts gérées. Les exceptions sont l'Europe, le Canada, et l'Inde. Ces régions n'ont que très peu de pâtures extensives sur lesquelles cultiver des TCR. Le Canada a également une très importante surface forestière.

Le rapport des coûts est variable selon les régions. En Chine et en Afrique, les forêts sont plus chères à produire, au contraire des USA et du Canada.

Le modèle est configuré pour commencer la production de TCR sur les terres les plus fertiles disponibles, puis pour s'étendre si nécessaire sur les classes de terre moins propices à l'agriculture. Le rendement de production diminue, mais la rente différentielle également. Dans certaines régions, cette diminution peut même compenser l'augmentation de coût liée au rendement décroissant ; c'est pourquoi certaines courbes d'offre présentent une décroissance du coût avec l'augmentation de la production.

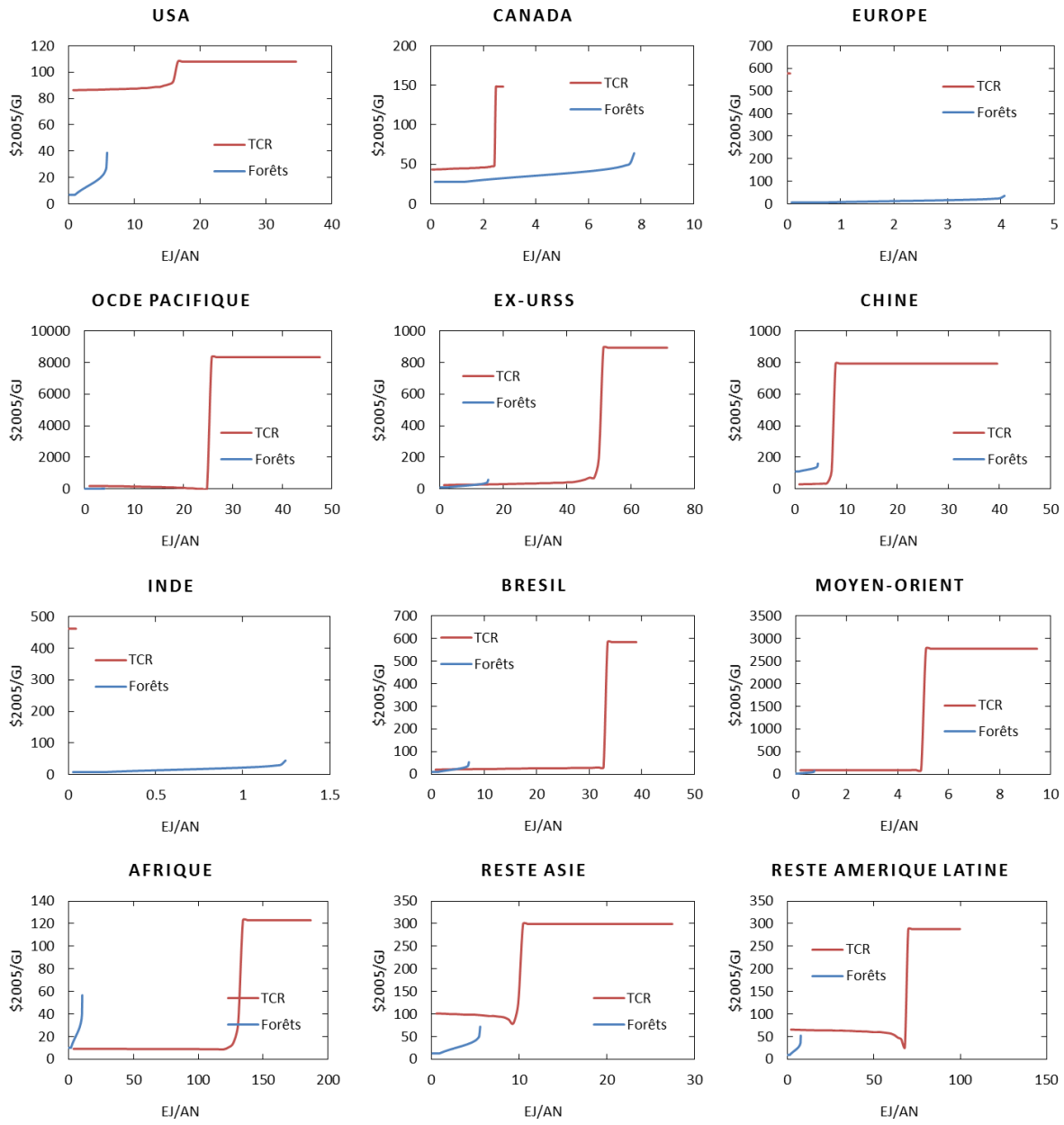


Figure 75: Courbes d'offre régionales pour les forêts et les TCR (courbes tracées en 2050, avec une taxe carbone à 48$/tonne$CO_2$eq.)

Le comportement des courbes varie entre les TCR et les forêts : les forêts voient leur coût augmenter progressivement avec la production, alors que les TCR ont un coût presque constant puis une augmentation brutale. En effet, dans le cas des TCR, lorsque la production augmente et que des terres moins fertiles sont mises en exploitation, les pertes de rendement sont compensées par la diminution du coût de la terre. Les coûts varient donc très peu d'un hectare à l'autre, jusqu'à atteindre le plafond de production, c'est-à-dire le potentiel technique. En revanche, les forêts n'ont pas cet effet de la rente : la variation des coûts provient de la difficulté croissante pour accéder à la ressource et l'exploiter.

L'échelle de la Figure 75 ne permet pas de distinguer le début des courbes d'offre des TCR ; or c'est sur cette première partie que s'effectue la concurrence entre régions pour la production. La Figure 76 se focalise sur le coût des premiers 5 EJ. L'Afrique affiche les coûts les moins élevés, suivie du Brésil et de l'ex-URSS. L'Europe et l'Inde n'apparaissent pas car leurs coûts sont trop élevés, à plus de 400 $/GJ.

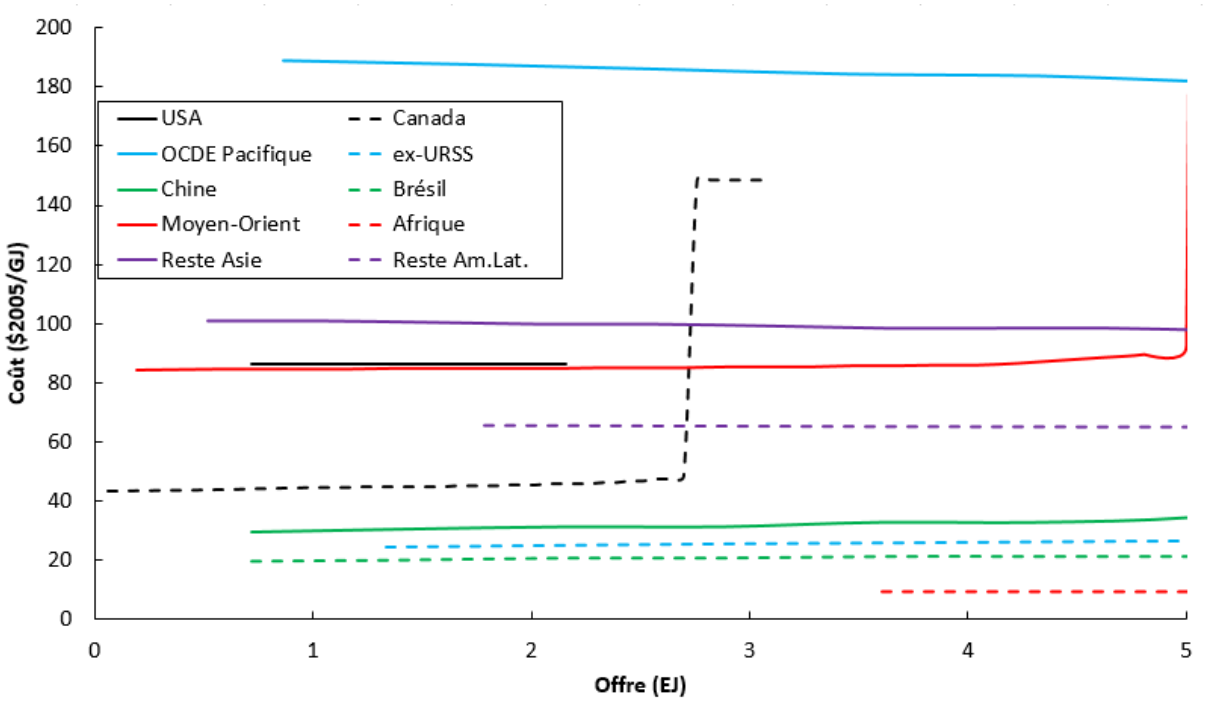


Figure 76: Courbe d'offre des TCR en 2050, en présence d'une taxe carbone à 48$/tonne$CO_2$eq.

Alors qu'on s'attendrait à ce que les coûts augmentent avec les quantités offertes, les courbes d'offre sont extrêmement plates. Ceci est lié aux hypothèses faites sur la rente foncière et la mobilisation des terres. Dans le modèle, la rente varie avec la qualité de la terre, les terres les plus fertiles coûtant le plus cher. Ces terres sont aussi les premières à être mobilisées pour la production de bioénergie. Pour augmenter l'offre, la production s'étend progressivement sur des terres de moins en moins fertiles. Avec la baisse des rendements, le coût de production au GJ augmente, mais le prix de la terre diminue. Ces deux effets se compensent presque parfaitement, donnant des courbes d'offre très plates. Si la rente foncière était la même sur toutes les catégories de terre, les courbes seraient strictement croissantes, comme dans Hoogwijk *et al.* (2009) par exemple [Hoogwijk et al., 2009].

La Figure 77 compare les courbes d'offre des TCR avec et sans taxe carbone.

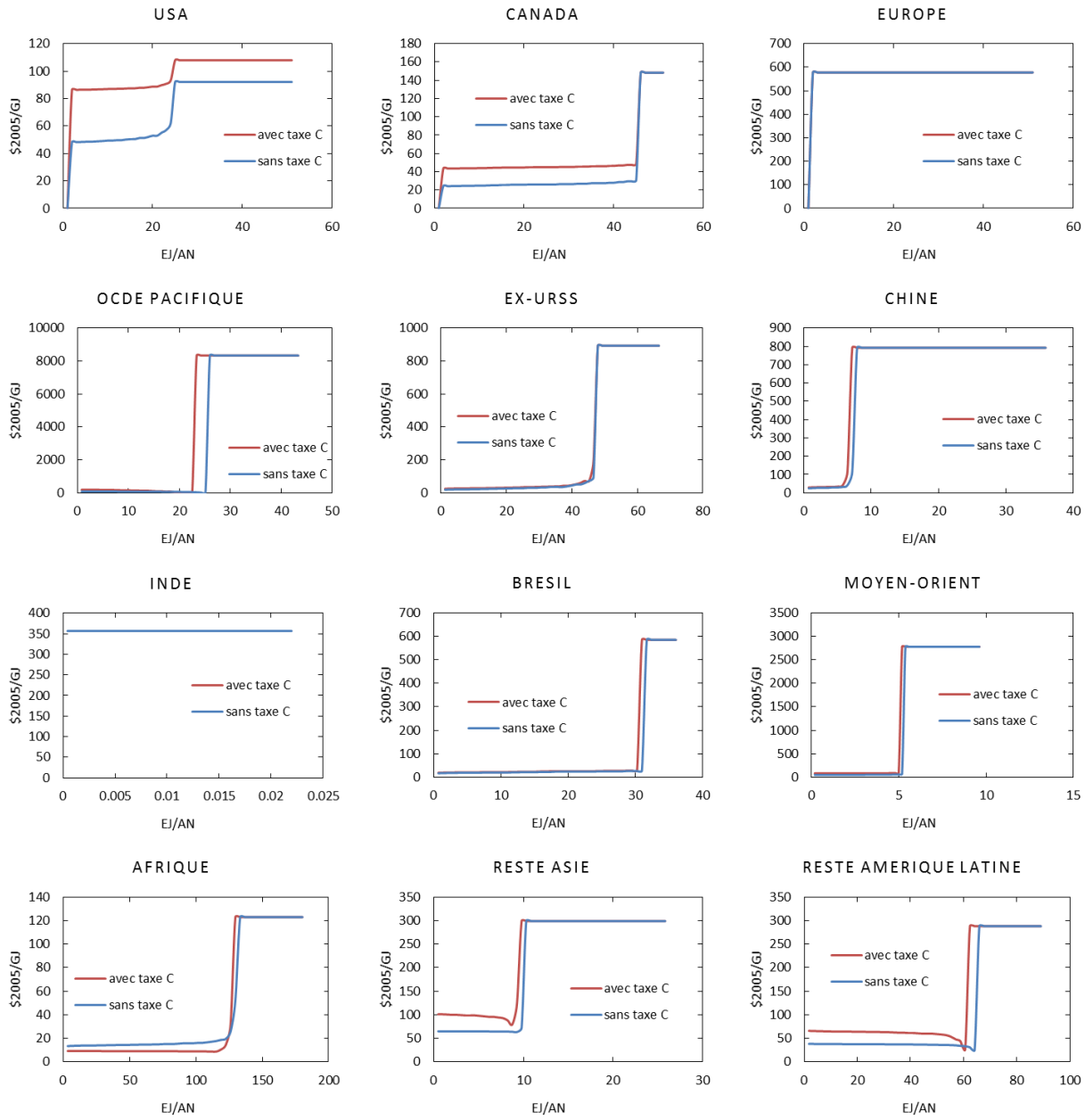


Figure 77: Courbes d'offre des Taillis à Courte Rotation en 2050, avec et sans taxe carbone

En raison des besoins en fertilisation des TCR, le coût augmente systématiquement avec l'introduction de la taxe, sauf en Afrique. Le système d'élevage africain est très inefficace, en particulier l'élevage intensif. Celui-ci, plus émetteur de gaz à effet de serre que le système extensif, voit ses coûts de production augmenter drastiquement avec l'introduction d'une taxe carbone. La rentabilité du système intensif, et donc la rente foncière des terres, diminue fortement. Les coûts de production hors coûts de la terre restent fixes, donc le coût total de production des TCR baisse.

La Figure 78 présente la rente foncière africaine dans les scénarios avec taxe carbone, en part de la rente des scénarios sans taxe carbone.

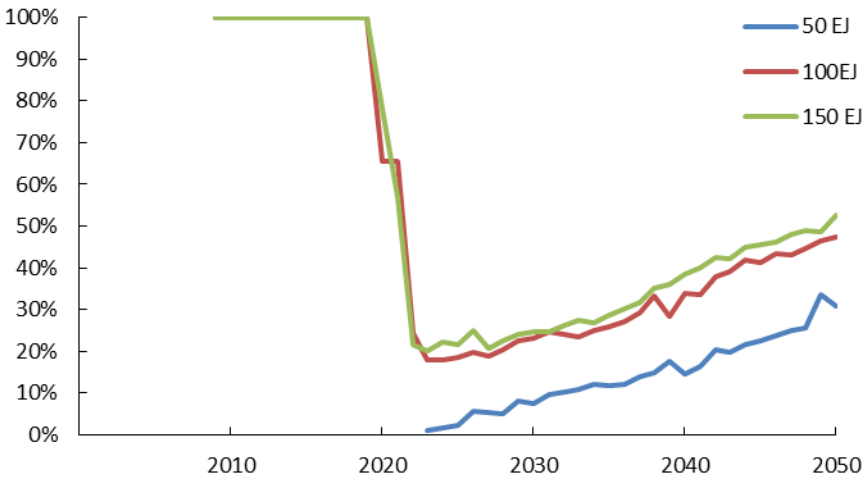


Figure 78: Rente foncière en Afrique en présence d'une taxe carbone, en part de la rente sans taxe carbone

On remarque que l'introduction de la taxe carbone en 2020 entraîne une chute de la rente de plus de 80%.

F - 2.2.2. Production de biomasse-énergie à l'horizon 2050

La Figure 79 et la Figure 80 présentent la production de bioénergie par les forêts et les TCR sous les six scénarios comparés.

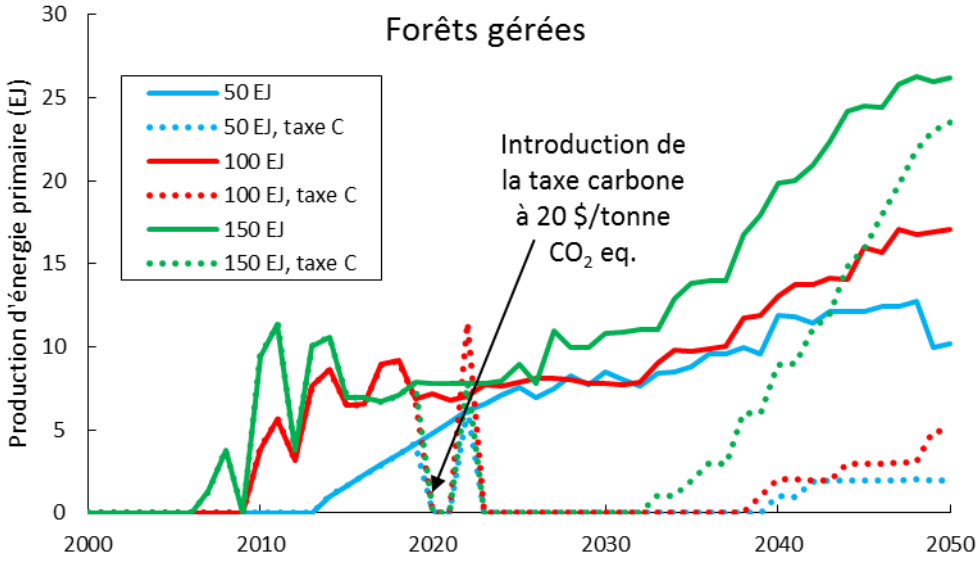


Figure 79: Production mondiale de bois énergie par les forêts gérées sous trois scénarios de demande, avec et sans taxe carbone

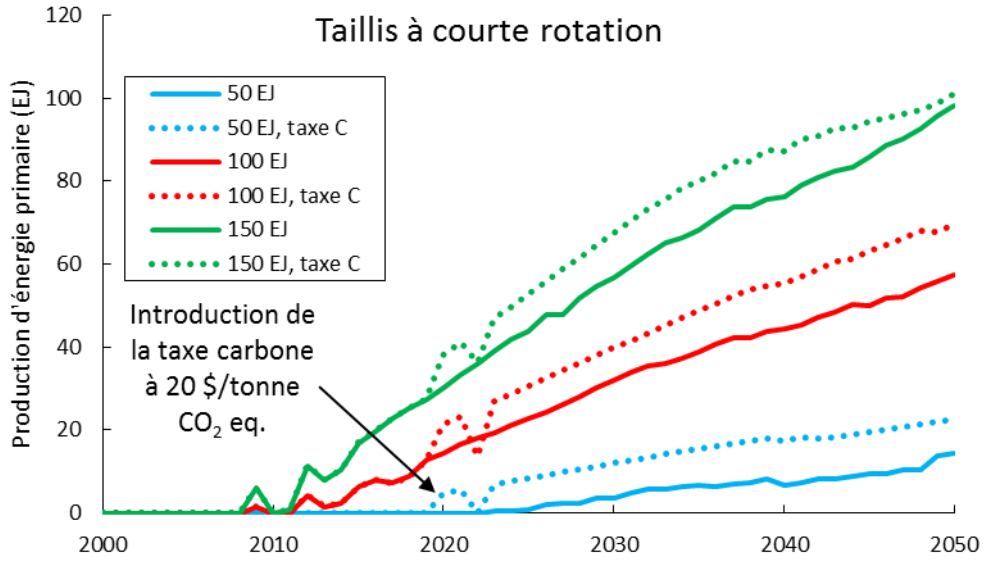


Figure 80: Production de bois énergie par les taillis à courte rotation sous trois scénarios de demande, avec et sans taxe carbone

Le modèle présente des oscillations avec la brusque introduction de la taxe carbone, mais se stabilise ensuite. La taxe fait fortement pencher la balance du côté des TCR, ce qui peut paraître contre-intuitif car, comme nous l'avons vu précédemment, la taxe carbone augmente les coûts de production des TCR dans toutes les régions sauf l'Afrique. On s'attendrait donc à ce que la production de TCR diminue avec l'introduction de la taxe carbone. Mais il s'avère que la production de TCR s'effectue majoritairement en Afrique ; en effet, cette région a de forts potentiels de production et des coûts faibles. Le modèle cherchant exclusivement à minimiser les coûts, c'est en Afrique que la production s'installe. L'introduction de la taxe carbone fait encore diminuer les coûts de production de TCR dans cette région en raison de sa structure agricole particulière. C'est pourquoi la production de TCR augmente. Le Tableau 27 présente les productions de bioénergie pour chaque région et chaque type de biomasse, pour les six scénarios.

Tableau 27: Production de bioénergie par région et type de biomasse, pour les 6 scénarios

Scénario		50 EJ	50 EJ (taxe C)	100 EJ	100 EJ (taxe C)	150 EJ	150 EJ (taxe C)
Production de bioénergie en 2050 (EJ)							
USA	Résidus	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
	Forêts	1,0	----	1,0	----	2,0	2,0
	TCR	----	----	----	----	----	----
	Total	4,1	3,1	4,1	3,1	5,1	5,1
Canada	Résidus	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	Forêts	2,0	1,0	4,0	1,0	5,0	5,0
	TCR	----	----	----	----	----	----
	Total	3,2	2,1	5,2	2,2	6,2	6,1

Scénario		50 EJ	50 EJ (taxe C)	100 EJ	100 EJ (taxe C)	150 EJ	150 EJ (taxe C)
Production de bioénergie en 2050 (EJ)							
Europe	Résidus	2,2	1,9	2,2	1,9	2,2	1,9
	Forêts	----	----	----	----	----	----
	TCR	----	----	----	----	----	----
	Total	2,2	1,9	----	1,9	----	1,9
OCDE Pacifique	Résidus	1,6	1,6	1,7	1,6	1,7	1,6
	Forêts	2,0	1,0	3,0	1,0	3,0	3,0
	TCR	----	----	----	----	----	----
	Total	3,7	2,6	4,7	2,6	4,7	4,6
Ex-URSS	Résidus	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
	Forêts	3,1	----	5,0	2,0	8,0	7,0
	TCR	----	----	----	----	2,0	----
	Total	6,3	3,2	8,2	5,2	13,2	10,1
Chine	Résidus	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
	Forêts	----	----	----	----	----	----
	TCR	----	----	----	----	----	----
	Total	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Inde	Résidus	----	----	----	----	----	----
	Forêts	----	----	----	----	----	----
	TCR	----	----	----	----	----	----
	Total	----	----	----	----	----	----
Brésil	Résidus	2,2	2,4	2,2	2,4	2,2	2,4
	Forêts	1,0	----	2,0	----	3,3	3,6
	TCR	----	----	----	----	7,7	2,4
	Total	3,2	2,4	4,2	2,4	13,2	8,3
Moyen-Orient	Résidus	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	Forêts	----	----	----	----	----	----
	TCR	----	----	----	----	----	----
	Total	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Afrique	Résidus	4,7	4,9	4,6	4,9	4,6	4,9
	Forêts	----	----	----	----	----	----
	TCR	14,3	22,6	57,3	69,5	88,6	98,6
	Total	18,9	27,4	61,9	74,4	93,2	103,5
Reste Asie	Résidus	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
	Forêts	----	----	----	----	1,0	----
	TCR	----	----	----	----	----	----
	Total	2,4	2,4	2,4	2,4	3,4	2,4
Reste Amérique Latine	Résidus	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
	Forêts	1,0	----	2,0	1,0	4,0	3,0
	TCR	----	----	----	----	----	----
	Total	4,4	3,4	5,4	4,4	7,4	6,4
Total	Résidus	25,6	25,5	25,6	25,5	25,6	25,5
	Forêts	10,2	2,0	17,1	5,0	26,2	23,5
	TCR	14,3	22,6	57,3	69,5	98,3	101,0
	Total	50,0	50,0	100,0	100,0	150,0	150,0

Il est à noter que l'Afrique a des potentiels de production substantiels. De plus, les coûts de production de la bioénergie sont faibles en comparaison des autres régions du globe. Il y a donc une forte incitation à produire de la bioénergie sur ce continent. La production en Afrique est d'ailleurs majoritaire dans une majorité des modèles comparés par l'*Energy Modelling Forum* [Stanford University, n.d.].

Cette centralisation de la production en Afrique soulève des questions sur le réalisme du modèle ; l'Afrique va voir une forte augmentation de sa population dans les années à venir, donc une augmentation de ses besoins en nourriture. Or, si la demande elle-même est prise en compte dans le modèle, il n'en est pas de même des problèmes d'accessibilité de la ressource. L'Afrique dispose de vastes réserves de terres et d'un potentiel d'augmentation des rendements substantiels : l'écart entre les rendements potentiels des terres et les rendements atteints est très supérieur à 50%. Cependant elle se caractérise aussi par un faible accès au marché, une absence de capital fixe ou circulant, et une absence d'intensification due à un manque d'infrastructures et d'investissement. Il semblerait donc difficile de développer rapidement une production massive de biomasse non alimentaire et destinée majoritairement à l'exportation vers les pays développés. Par ailleurs, certaines régions africaines rencontrent déjà des problèmes de sécheresse, qui ne vont aller qu'en s'aggravant avec le changement climatique. L'impact du changement climatique n'est pas pris en compte dans les scénarios testés ; les résultats seraient sans doute drastiquement différents.

Ce sont là les limites de la modélisation du NLU, avec notamment d'importantes failles concernant la représentation de l'accès aux marchés et l'évolution du climat. Tout d'abord, les besoins en eau des cultures sont partiellement pris en compte dans les rendements potentiels des terres, mais ces rendements sont fixes et ne tiennent pas compte des futurs dérèglements climatiques. Le réel impact sur la ressource en eau est donc inconnu. Ensuite, on considère que les déséquilibres entre offre et demande de biénergie au sein d'une région peuvent être compensés instantanément par le commerce avec le reste du globe, ce qui est impossible en réalité. Tous les modèles de potentiel souffrent d'ailleurs de ce problème : oui, le potentiel technique est peut-être là, oui il serait théoriquement possible de produire de la biomasse à coût raisonnable, mais les infrastructures de production et de transport à grande échelle ne sont pas en place et demanderaient beaucoup d'investissement. Le développement de la biomasse-énergie se fera d'abord à une échelle beaucoup plus réduite, et en priorité par des politiques locales.

En-dehors des problèmes d'infrastructures, il reste l'impact sur les prix des productions alimentaires et les problèmes socio-économiques que celui-ci pourrait entraîner. En effet le modèle ne représente pas l'insécurité alimentaire, les émeutes de la faim, l'instabilité politique etc.

Le modèle n'aborde pas non plus la question des formes d'énergie finale qui sont demandées. La conversion en énergie finale demande encore des investissements et des infrastructures, et comme on l'a vu précédemment, la technologie de conversion influence les rendements énergétiques, les émissions polluantes et les coûts de l'énergie.

Les coûts de production de la bioénergie présentent encore énormément d'incertitudes, non seulement sur leur niveau mais encore plus sur leur composition : division entre capital et travail, part des engrais, etc. Dans la revue de littérature, les cultures dédiées apparaissent moins chères que la forêt, mais il faut noter que les données sur ces cultures proviennent soit de calculs théoriques, soit de projets pilotes, et non de productions actuellement commercialisées comme la forêt.

La question de la répartition régionale et des potentiels économiques reste ouverte. Les réservoirs de potentiel technique se situent plutôt dans les pays tropicaux et en Russie, mais se pose la question des infrastructures et de la localisation de la demande. Notre modélisation ne peut pour l'instant répondre à ces questions, mais ce sont des pistes de recherche future.

G. Conclusion

L'utilisation du bois pour l'énergie peut être un levier de diminution des émissions de gaz à effet de serre, mais la chaîne de production doit être considérée dans son ensemble et la gestion de la ressource a un impact non négligeable sur le bilan environnemental final. Les plantations sylvicoles destinées en priorité à la production de bois d'œuvre ne doivent pas être systématiquement converties et intensifiées. En effet, l'intensification de l'exploitation et le raccourcissement des cycles de croissance diminuent l'effet de puits de carbone de la forêt et donc l'avantage du bois vis-à-vis des énergies fossiles. L'utilisation en cascade des produits bois, avec recyclage puis récupération d'énergie, doit être privilégiée, tout comme l'utilisation prioritaire de ressources locales.

A petite échelle, l'effet de la technologie sur l'impact du chauffage au bois est important. Les réseaux de chaleur sont un moyen efficace de développer l'utilisation du bois pour le chauffage, tant du point de vue énergétique qu'économique, si la ressource bois est produite dans la région. Les technologies à granulés ont vu leur popularité augmenter ces dernières années, en raison de leur rendement énergétique élevé et de leur facilité d'utilisation. Ces avantages compensent, pour certains utilisateurs, le fort coût d'investissement de ces systèmes. Les technologies à granulés présentent également une meilleure qualité de combustion que les poêles et chaudières traditionnels à bûches. Les poêles à bûches produisent notamment beaucoup de Composés Organiques Volatils et de particules qui peuvent avoir des impacts importants sur la santé humaine. La production de ces polluants peut varier fortement avec l'humidité du combustible et l'apport d'air, ce qui rend d'autant plus importante une bonne utilisation et un entretien régulier des équipements.

Cependant si la biomasse-énergie doit se développer à grande échelle, l'exploitation des forêts et des plantations sylvicoles ne suffira pas à répondre à la demande mondiale, en raison des faibles rendements et des coûts élevés de production. La culture de plantes ligno-cellulosiques à croissance rapide devra être mise en place dans les régions où les terres sont disponibles, ce qui exclut l'Inde et l'Europe par exemple. Les potentiels de production à l'échelle mondiale sont présents, mais le développement de ces cultures soulève des problèmes d'infrastructure, de compétition avec la production alimentaire, et d'impacts liés au changement d'usage des sols.

Cette thèse montre que l'échelle d'analyse peut être un facteur limitant pour répondre à certaines questions, et est confrontée à des défis spécifiques. Ainsi, l'étude de la filière bois en France ne donne finalement pas beaucoup d'éléments sur la place de la biomasse dans une politique mondiale de réduction des émissions de GES, et une étude menée au niveau de l'Union Européenne n'apporterait pas beaucoup plus de réponses. Les enjeux se situent en effet au niveau des grands réservoirs de production que sont l'Amérique du sud, l'Afrique, et la Russie, avec une place prédominante des cultures dédiées. Réciproquement, l'analyse mondiale ne prend pas en compte des facteurs localisés qui peuvent être décisifs pour l'établissement des filières biomasse ligno-cellulosique, en particulier l'accès au marché. Ceci conduit à des évaluations très optimistes et une production dans des régions où le réalisme de ces filières est limité, comme illustré par les résultats obtenus.

A petite échelle, les questions techniques sont dominantes ; mais l'augmentation des objectifs fait apparaître rapidement les problèmes de disponibilité de la ressource et d'approvisionnement. Un exemple en France est la centrale thermique de Gardanne, dont les besoins s'élèvent à 850.000 tonnes de bois par an. La région n'étant pas capable d'y répondre, la centrale a été alimentée partiellement à partir de bois importé, avant d'être fermée par une décision du tribunal administratif en raison de l'insuffisance des analyses d'impact sur la ressource de la région [Bertrand, 2017; de Broqua, 2017].

Principales avancées de cette thèse

Grâce à la modélisation de la combustion basée sur des données d'émissions mesurées en laboratoire, nous avons pu fiabiliser le bilan matière et énergie de l'ensemble de la chaîne de production de la forêt à l'usager final. L'Analyse de Cycle de Vie a démontré l'importance non seulement de la qualité de la combustion, mais aussi des étapes de transformation de la biomasse, notamment l'étape de séchage des granulés de bois. Cette étape pénalise largement les scénarios à granulés, qui par ailleurs bénéficient de rendements énergétiques élevés. Une substitution des énergies fossiles par des énergies à moindre contenu carbone permettrait d'améliorer le bilan environnemental de cette forme de bois-énergie en plein développement.

L'ACV a également démontré l'importance du CO_2 biogénique et de sa comptabilisation dans l'impact Changement Climatique des scénarios bois-énergie. Le considérer comme neutre du point de vue du changement climatique abaisse artificiellement l'impact des scénarios basés sur l'exploitation des forêts, en raison de la durée du cycle de réabsorption du carbone.

Par une ACV dynamique, nous avons constaté que l'intensification des itinéraires forestiers, par un raccourcissement des cycles de croissance et/ou par une récolte plus intensive des petits bois et rémanents, entraîne une baisse du stock de carbone dans le sol et une hausse du potentiel global de réchauffement climatique. Cette augmentation des impacts n'est pas suffisamment compensée par l'augmentation de la production de biomasse. Le développement de la filière forestière en France devrait plutôt être orienté sur l'exploitation raisonnée des forêts actuellement à l'abandon, où un excédent de biomasse est disponible.

L'analyse technico-économique menée sur les scénarios bois-énergie a démontré l'intérêt des scénarios à réseau de chaleur qui sont les solutions les moins chères pour l'utilisateur final, en raison des économies d'échelle et du faible coût du combustible utilisé. Les technologies à granulés souffrent d'un niveau d'investissement important et donc ne sont pas compétitives. Par contre, les scénarios à bûches sont très bon marché, et peuvent absorber une augmentation conséquente du prix de leur combustible avant de rattraper les scénarios fossiles.

Pour avoir une perspective plus large, une modélisation économique à l'échelle mondiale a aussi été menée, avec pour but de simuler la production de bioénergie dans plusieurs scénarios de demande, avec et sans taxe carbone. En l'absence de corrélation entre la localisation de l'offre et de la demande, on constate que la production de biomasse-énergie se base principalement sur des cultures dédiées comme les Taillis à Courte Rotation, et que cette production s'effectue presque exclusivement en Afrique. Ceci soulève des questions à la fois techniques, économiques et éthiques. Le continent africain a certes un large potentiel de production, mais les infrastructures et les liquidités manquent, et des difficultés d'approvisionnement en nourriture sont déjà présentes dans certaines régions.

H. Perspective

Pour étendre ce travail, une analyse plus détaillée spatialement pourrait être envisagée, par exemple en prenant en compte la localisation des centres de production de bois vis-à-vis des centres de consommation, et les impacts écologiques et économiques entraînés par le transport. On pourrait par exemple appliquer la méthodologie d'ACV territoriale à une région productrice comme la Lorraine ou les Landes, en intégrant la modélisation de la forêt et des technologies de combustion. Cette approche pourrait permettre notamment de mieux quantifier l'impact du transport entre les zones productrices et les zones consommatrices.

La méthodologie d'ACV dynamique nécessite de connaître l'efficacité radiative et le comportement des polluants une fois rejetés dans l'atmosphère. Avec les progrès dans la caractérisation des polluants de la combustion, on pourra envisager d'intégrer plus de polluants mineurs dans une ACV dynamique. Ceci pourrait être intéressant car la majorité des polluants ont un temps de séjour dans l'atmosphère assez court, mais une efficacité radiative très forte. L'impact changement climatique présenterait donc un pic très important au moment de l'émission.

Du côté de la modélisation économique mondiale, plusieurs pistes de progression se présentent. Tout d'abord, on pourrait améliorer les connaissances sur les coûts de production de la bioénergie, trouver des données dans les continents qui ne sont pas encore renseignés, et mieux comprendre la répartition des coûts entre les différents postes (capital, travail, etc.). La qualité des données est néanmoins limitée par le fait que les Taillis à Courte Rotation sont encore au stade de démonstration. Ensuite, les infrastructures et les conditions d'accès au marché pourraient être représentées de façon plus détaillée, pour mieux refléter le potentiel de production réel dans les pays en voie de développement. Enfin, il serait intéressant d'effectuer le couplage avec un modèle d'équilibre mondial comme Imaclim, afin d'avoir une demande régionalisée. Ceci permettrait de prendre en compte les frais de transport de la biomasse, et peut-être ainsi d'avoir une production mieux répartie sur le globe.

Références

Abdelouahed, L., Authier, O., Mauviel, G., Corriou, J.P., Verdier, G., Dufour, A., 2012. Detailed Modeling of Biomass Gasification in Dual Fluidized Bed Reactors under Aspen Plus. Energy Fuels 26, 3840–3855. doi:10.1021/ef300411k

ADEME, 2005. Introduction à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) (Note de synthèse). ADEME.

ADEME, 2010a. Life Cycle Assessments Applied to First Generation Biofuels Used in France. ADEME.

ADEME, 2010b. Evaluation des coûts d'exploitation associés aux chaufferies biomasse. ADEME.

ADEME, 2012a. Information CO2 des prestations de transport - Application de l'article L. 1431-3 du code des transports - Guide méthodologique.

ADEME, 2012b. Les biocarburants de 1ère génération (Les Avis de l'ADEME).

ADEME, 2014. Etude sur le prix des combustibles bois en 2013 et 2014 (Etude, Rapport). Ademe.

ADEME, 2015. Etat de l'art sur la production de molécules chimiques issues du bois en France (Rapport).

Aissani, L., Vaxelaire, S., Papinot, P.-E., Védrine, H., Mollaret, M.-E., Villeneuve, J., 2012. Méthodes d'évaluation des impacts environnementaux des opérations de prétraitement des déchets. Projet CleanWasT.

Alexandratos, N., Bruinsma, J., 2012. World Agriculture towards 2030/2050 - the 2012 revision (ESA Working Paper No. 12-03). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Agricultural Development Economics Division.

AMORCE/ADEME, 2013. Les réseaux de chaleur au bois en 2012 (Série Technique).

AMORCE/ADEME, 2015. Comparatif des modes de chauffage et Prix de vente de la chaleur en 2013 - Réseaux de chaleur (No. RCE23). AMORCE, Villeurbanne.

Anderson, K., Peters, G.P., 2016. The trouble with negative emissions - Reliance on negative-emission concepts locks in humankind's carbon addiction. Clim. Change 354, 182–183.

Anttila, P., Asikainen, A., Laitila, J., Broto, M., Campanero, I., Lizarralde, I., Rodríguez, F., 2011. Potential and supply costs of wood chips from forests in Soria, Spain. For. Syst. 20, 245–254. doi:10.5424/fs/2011202-10363

Asikainen, A., Laitila, J., 2006. Harvesting and transport costs of forest energy.

AspenTech, n.d. Chemical Process Optimization Software - Chemical Process Design | Aspen Plus [WWW Document]. URL http://www.aspentech.com/products/engineering/aspen-plus/ (accessed 8.7.17).

Assemblée Nationale, 2009. LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, 2009-967.

Azzalini, A., 1985. A Class of Distributions Which Includes the Normal Ones. Scand. J. Stat. 12, 171–178.

Bare, J.C., Hofstetter, P., Pennington, D.W., Haes, H.A.U. de, 2000. Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits. Int. J. Life Cycle Assess. 5, 319. doi:10.1007/BF02978665

Bastien, Y., 2000. Sylviculture du hêtre.

Bauen, A.W., Dunnett, A.J., Richter, G.M., Dailey, A.G., Aylott, M., Casella, E., Taylor, G., 2010. Modelling supply and demand of bioenergy from short rotation coppice and Miscanthus in the UK. Bioresour. Technol. 101, 8132–8143. doi:10.1016/j.biortech.2010.05.002

Baumann, H., 1996. LCA Use in Swedish Industry. Int. J. Life Cycle Assess. 1, 122–126.

Baumann, H., 1998. Life Cycle Assessment and Decision Making: Theories and Practices (Doctoral thesis). Chalmers University of Technology.

Beringer, T., Lucht, W., Schaphoff, S., 2011. Bioenergy production potential of global biomass plantations under environmental and agricultural constraints. GCB Bioenergy 3, 299–312. doi:10.1111/j.1757-1707.2010.01088.x

Berndes, G., Azar, C., Kåberger, T., Abrahamson, D., 2001. The feasibility of large-scale lignocellulose-based bioenergy production. Biomass Bioenergy 20, 371–383. doi:10.1016/S0961-9534(01)00002-2

Bertrand, M.-N., 2017. Gardanne, la centrale qui voulait se faire plus grosse que la forêt. L'Humanité.

Bibas, R., Méjean, A., 2014. Potential and limitations of bioenergy for low carbon transitions. Clim. Change 123, 731–761. doi:10.1007/s10584-013-0962-6

Bjoerklund, A., Johansson, J., Nilsson, M., Eldh, P., Finnveden, G., 2003. Environmental Assessment of a Waste Incineration Tax. Case Study and Evaluation of a Framework for Strategic Environmental Assessment (No. FMS--184). Stockholm Univ. and Swedish Defence Research Agency.

Bondeau, A., Smith, P.C., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., Lotze-Campen, H., Müller, C., Reichstein, M., Smith, B., 2007. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. Glob. Change Biol. 13, 679–706. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01305.x

Bontemps, J.-D., Duplat, P., Hervé, J.-C., Dhôte, J.-F., 2007. Croissance en hauteur dominante du Hêtre dans le Nord de la France – Des courbes de référence qui intègrent les tendances à long terme. Rendez-Vous Tech. ONF 39–47.

Bright, R.M., Strømman, A.H., Hawkins, T.R., 2010. Environmental Assessment of Wood-Based Biofuel Production and Consumption Scenarios in Norway. J. Ind. Ecol. 14, 422–439. doi:10.1111/j.1530-9290.2010.00249.x

Brundtland, G.H., 1987. Notre avenir à tous. Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'ONU.

Bugge, M., Skreiberg, Ø., Haugen, N.E.L., Carlsson, P., Seljeskog, M., 2015. Predicting NOx Emissions from Wood Stoves using Detailed Chemistry and Computational Fluid Dynamics. Energy Procedia, Clean, Efficient and Affordable Energy for a Sustainable Future: The 7th International Conference on Applied Energy (ICAE2015) 75, 1740–1745. doi:10.1016/j.egypro.2015.07.446

Caserini, S., Livio, S., Giugliano, M., Grosso, M., Rigamonti, L., 2010. LCA of domestic and centralized biomass combustion: The case of Lombardy (Italy). Biomass Bioenergy 34, 474–482. doi:10.1016/j.biombioe.2009.12.011

Caurla, S., 2012. Modélisation de la filière forêt-bois française - Évaluation des impacts des politiques climatiques (PhD thesis). AgroParisTech.

Cespi, D., Passarini, F., Ciacci, L., Vassura, I., Castellani, V., Collina, E., Piazzalunga, A., Morselli, L., 2013. Heating systems LCA: comparison of biomass-based appliances. Int. J. Life Cycle Assess. 19, 89–99. doi:10.1007/s11367-013-0611-3

Chandioux, O., Ricodeau, N., 2013. Le prix de mon arbre: Quelle est la valeur du pin d'Alep? (The price of my tree: What is the value of Alep pine?).

Cherubini, F., Bright, R.M., Strømman, A.H., 2012. Site-specific global warming potentials of biogenic CO2 for bioenergy: contributions from carbon fluxes and albedo dynamics. Environ. Res. Lett. 7, 045902. doi:10.1088/1748-9326/7/4/045902

Cherubini, F., Strømman, A.H., Hertwich, E., 2011. Effects of boreal forest management practices on the climate impact of CO2 emissions from bioenergy. Ecol. Model., Can We Break the Addiction to Fossil Energy? Special Issue, 7th Biennial International Workshop "Advances in Energy Studies", Barcelona, Spain, 19-21 October 2010 223, 59–66. doi:10.1016/j.ecolmodel.2011.06.021

CNPF, n.d. Home - CNPF - Centre national de la propriété forestière [WWW Document]. URL http://www.cnpf.fr/ (accessed 9.13.17).

Collet, S., 2009. Emissions from wood domestic heating appliances. Pollut. Atmos. Clim. Santé Société 83–90.

Consumer Price Index (CPI) [WWW Document], n.d. URL https://www.bls.gov/cpi/ (accessed 4.20.17).

Cooper, J.A., 1980. Environmental Impact of Residential Wood Combustion Emissions and its Implications. J. Air Pollut. Control Assoc. 30, 855–861. doi:10.1080/00022470.1980.10465119

Cowell, S.J., 1998. Environmental life cycle assessment of agricultural systems : integration into decision-making. (Ph.D.). University of Surrey.

Creutzig, F., 2016. Economic and ecological views on climate change mitigation with bioenergy and negative emissions. GCB Bioenergy 8, 4–10. doi:10.1111/gcbb.12235

Creutzig, F., Ravindranath, N.H., Berndes, G., Bolwig, S., Bright, R., Cherubini, F., Chum, H., Corbera, E., Delucchi, M., Faaij, A., Fargione, J., Haberl, H., Heath, G., Lucon, O., Plevin, R., Popp, A., Robledo-Abad, C., Rose, S., Smith, P., Stromman, A., Suh, S., Masera, O., 2015. Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. GCB Bioenergy 7, 916–944. doi:10.1111/gcbb.12205

CRPF Bretagne, 2009. Etude de faisabilité pour la production de plaquettes forestières en Bretagne. CRPF Bretagne, France.

Curran, M.A., Mann, M., Morris, G., 2002. Report on the International Workshop on Electricity Data for Life Cycle Inventories. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory.

Dagenais, B., 2009. Py4J - A bridge between Python and Java [WWW Document]. URL https://www.py4j.org/ (accessed 4.12.17).

de Broqua, A., 2017. Gardanne : la centrale biomasse interdite d'exploitation. Le Figaro.

de Vries, B.J.M., van Vuuren, D.P., Hoogwijk, M.M., 2007. Renewable energy sources: Their global potential for the first-half of the 21st century at a global level: An integrated approach. Energy Policy 35, 2590–2610. doi:10.1016/j.enpol.2006.09.002

de Wit, M., Faaij, A., 2010. European biomass resource potential and costs. Biomass Bioenergy, A roadmap for biofuels in Europe 34, 188–202. doi:10.1016/j.biombioe.2009.07.011

de Wit, M., Junginger, M., Faaij, A., 2013. Learning in dedicated wood production systems: Past trends, future outlook and implications for bioenergy. Renew. Sustain. Energy Rev. 19, 417–432. doi:10.1016/j.rser.2012.10.038

DeAngelis, D.G., Ruffin, D.S., Reznik, R.B., 1979. Source assessment: Wood-Fired Residential Combustion Equipment Field Tests (No. MRC-DA-EPA-600/2-79-019). U.S. Environmental Protection Agency.

Dieckhoff, L., Authier, O., 2013. A technical, economic and environmental evaluation of challenging biomass feedstocks in France for combined heat and power (CHP) gasification. Presented at the 21st European Biomass Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark, pp. 83–94. doi:10.5071/21stEUBCE2013-1BO.6.4

Dornburg, V., Faaij, A.P.C., 2001. Efficiency and economy of wood-fired biomass energy systems in relation to scale regarding heat and power generation using combustion and gasification technologies. Biomass Bioenergy 21, 91–108. doi:10.1016/S0961-9534(01)00030-7

Dornburg, V., Termeer, G., Faaij, A.P.C., 2005. Economic and greenhouse gas emission analysis of bioenergy production using multi-product crops—case studies for the Netherlands and Poland. Biomass Bioenergy 28, 454–474. doi:10.1016/j.biombioe.2004.11.012

Dornburg, V., Vuuren, D. van, Ven, G. van de, Langeveld, H., Meeusen, M., Banse, M., Oorschot, M. van, Ros, J., Born, G.J. van den, Aiking, H., Londo, M., Mozaffarian, H., Verweij, P., Lysen, E., Faaij, A., 2010. Bioenergy revisited: Key factors in global potentials of bioenergy. Energy Environ. Sci. 3, 258–267. doi:10.1039/B922422J

Dufour-Kowalski, S., Courbaud, B., Dreyfus, P., Meredieu, C., De Coligny, F., 2012. Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling. Ann. For. Sci. 69, 221–233. doi:10.1007/s13595-011-0140-9

EarthShift, n.d. CML 2001 Impact Assessment Method [WWW Document]. URL http://www.earthshift.com/software/simapro/clm2001 (accessed 4.13.15).

EcoInvent, n.d. ecoinvent [WWW Document]. URL http://www.ecoinvent.org/ (accessed 7.12.17).

EDF SA, 2016. Grilles tarifaires de l'offre de fourniture d'électricité "Tarif Bleu" (Price of electricity under the "Tarif Bleu" contract).

EEA, 2016. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - 2016 (EEA Report No. No 21/2016). European Environment Agency (EEA), Luxembourg.

Ekvall, T., 1999. System Expansion and Allocation in Life Cycle Assessment With Implications for Wastepaper Management (Doctoral thesis). Chalmers University of Technology.

Ekvall, T., Weidema, B.P., 2004. System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis. Int. J. Life Cycle Assess. 9, 161–171. doi:10.1007/BF02994190

El Hage, R., 2010. Prétraitement du Miscanthus x giganteus. Vers une valorisation optimale de la biomasse lignocellulosique. (Thèse de doctorat). Nancy Université, Vandoeuvre-lès-Nancy.

Eriksson, O., Finnveden, G., Ekvall, T., Björklund, A., 2007. Life cycle assessment of fuels for district heating: A comparison of waste incineration, biomass- and natural gas combustion. Energy Policy 35, 1346–1362. doi:10.1016/j.enpol.2006.04.005

Eriksson, O., Frostell, B., Björklund, A., Assefa, G., Sundqvist, J.-O., Granath, J., Carlsson, M., Baky, A., Thyselius, L., 2002. ORWARE—a simulation tool for waste management. Resour. Conserv. Recycl. 36, 287–307. doi:10.1016/S0921-3449(02)00031-9

European Commission, 2017. Indirect Land Use Change (ILUC).

Fallot, A., Girard, P., Dameron, V., Griffon, M., 2006. The assessment of biofuel potentials on global and regional scales in the tropical world. Energy Sustain. Dev. 10, 80–91. doi:10.1016/S0973-0826(08)60534-7

FAO, 2008. La Situation Mondiale de l'Alimentation et de l'Agriculture 2008. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome, Italie.

Fibois Alsace, 2007. Panorama de la filière bois énergie en Alsace (The energy wood production chain in Alsace).

Finnveden, G., Johansson, J., Lind, P., Moberg, Å., 2005. Life cycle assessment of energy from solid waste—part 1: general methodology and results. J. Clean. Prod., Environmental Assessments and Waste Management 13, 213–229. doi:10.1016/j.jclepro.2004.02.023

Fischer, G., Schrattenholzer, L., 2001. Global bioenergy potentials through 2050. Biomass Bioenergy 151–159.

Fortin, M., 2016. Modélisation de la dynamique et des caractéristiques forestières à différentes échelles - Evaluation de l'incertitude et propagation des erreurs (Thèse HDR).

France Bois Forêt, 2013. Variétés forestières améliorées - Pour une forêt d'avenir.

François, D., 2006. Etude visant à estimer le bilan technico-économique de la production et de la mobilisation de bois énergie dans les forêts lorraines.

François, J., 2014. Modélisation et évaluation environnementale des filières de cogénération par combustion et gazéification du bois (Mécanique et énergétique). Université de Lorraine, Nancy.

François, J., Fortin, M., Patisson, F., Dufour, A., 2014. Assessing the Fate of Nutrients and Carbon in the Bioenergy Chain through the Modeling of Biomass Growth and Conversion. Environ. Sci. Technol. doi:10.1021/es5032823

GIEC, 2007. Changements climatiques 2007 - rapport de synthèse. Genève, Suisse.

Gipeblor, adib, AproValBois, Valeur Bois, Fibois Alsace, Nord Picardie Bois, 2014. Suivi de l'évolution du bois énergie sur les régions du Grand Nord Est de la France - Données 2012. Gipeblor.

Gitz, V., 2004. Changement d'usage des terres et politiques climatiques globales (Thèse de doctorat). ENGREF, Paris.

Gitz, V., Ciais, P., 2003. Amplifying effects of land-use change on future atmospheric CO2 levels. Glob. Biogeochem. Cycles 17, 24–1.

Giuntoli, J., Caserini, S., Marelli, L., Baxter, D., Agostini, A., 2015. Domestic heating from forest logging residues: environmental risks and benefits. J. Clean. Prod. 99, 206–216. doi:10.1016/j.jclepro.2015.03.025

Groscurth, H.-M., de Almeida, A., Bauen, A., Costa, F.B., Ericson, S.-O., Giegrich, J., von Grabczewski, N., Hall, D.O., Hohmeyer, O., Jörgensen, K., Kern, C., Kühn, I., Löfstedt, R., da Silva Mariano, J., Mariano, P.M.G., Meyer, N.I., Nielsen, P.S., Nunes, C., Patyk, A., Reinhardt, G.A., Rosillo-Calle, F., Scrase, I., Widmann, B., 2000. Total costs and benefits of biomass in selected regions of the European Union. Energy 25, 1081–1095. doi:10.1016/S0360-5442(00)00016-5

Guest, G., Bright, R.M., Cherubini, F., Michelsen, O., Strømman, A.H., 2011. Life Cycle Assessment of Biomass-based Combined Heat and Power Plants. J. Ind. Ecol. 15, 908–921. doi:10.1111/j.1530-9290.2011.00375.x

Guest, G., Cherubini, F., Strømman, A.H., 2013. Climate impact potential of utilizing forest residues for bioenergy in Norway. Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change 18, 1089–1108. doi:10.1007/s11027-012-9409-z

Haberl, H., Erb, K.-H., Krausmann, F., Bondeau, A., Lauk, C., Müller, C., Plutzar, C., Steinberger, J.K., 2011. Global bioenergy potentials from agricultural land in 2050: Sensitivity to climate change, diets and yields. Biomass Bioenergy, Land use impacts of bioenergy. Selected papers from the IEA Bioenergy Task 38 Meetings in Helsinki, 2009 and Brussels, 2010 35, 4753–4769. doi:10.1016/j.biombioe.2011.04.035

Hallam, A., Anderson, I.C., Buxton, D.R., 2001a. Comparative economic analysis of perennial, annual, and intercrops for biomass production. Biomass Bioenergy 21, 407–424. doi:10.1016/S0961-9534(01)00051-4

Hallam, A., Anderson, I.C., Buxton, D.R., 2001b. Comparative economic analysis of perennial, annual, and intercrops for biomass production. Biomass Bioenergy 21, 407–424. doi:10.1016/S0961-9534(01)00051-4

Havlík, P., Schneider, U.A., Schmid, E., Böttcher, H., Fritz, S., Skalský, R., Aoki, K., Cara, S.D., Kindermann, G., Kraxner, F., Leduc, S., McCallum, I., Mosnier, A., Sauer, T., Obersteiner, M., 2011. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets. Energy Policy, Sustainability of biofuels 39, 5690–5702. doi:10.1016/j.enpol.2010.03.030

Hayes, S.W., Keegan, C.E.I., Morgan, T.A., 2011. Estimating Harvesting Costs.

Heijungs, R., 1997. Economic drama and the environmental stage : formal derivation of algorithmic tools for environmental analysis and decision-support from a unified epistemological principle (PhD thesis). Leiden University.

Heintz, B., Baisnée, P., 1992. System boundaries. Presented at the SETAC-Europe Worshop on Life-Cycle Assessment, Leiden, pp. 35–52.

Hoefnagels, R., Resch, G., Junginger, M., Faaij, A., 2014. International and domestic uses of solid biofuels under different renewable energy support scenarios in the European Union. Appl. Energy 131, 139–157. doi:10.1016/j.apenergy.2014.05.065

Hoefnagels, R., Smeets, E., Faaij, A., 2010. Greenhouse gas footprints of different biofuel production systems. Renew. Sustain. Energy Rev. 14, 1661–1694. doi:10.1016/j.rser.2010.02.014

Hofstetter, P., 1998. Perspectives in Life Cycle Impact Assessment: A Structured Approach to Combine Models of the Technosphere, Ecosphere and Valuesphere. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Hoogwijk, M., Faaij, A., de Vries, B., Turkenburg, W., 2009. Exploration of regional and global cost–supply curves of biomass energy from short-rotation crops at abandoned cropland and rest land under four IPCC SRES land-use scenarios. Biomass Bioenergy 33, 26–43. doi:10.1016/j.biombioe.2008.04.005

Hoogwijk, M., Faaij, A., Eickhout, B., de Vries, B., Turkenburg, W., 2005. Potential of biomass energy out to 2100, for four IPCC SRES land-use scenarios. Biomass Bioenergy 29, 225–257. doi:10.1016/j.biombioe.2005.05.002

Hourcade, J.C., Sassi, O., Crassous, R., Gitz, V., Waisman, H., Guivarch, C., 2010. IMACLIM-R: a modelling framework to simulate sustainable development pathways. Int. J. Glob. Environ. Issues 10, 5–24. doi:10.1504/IJGENVI.2010.030566

Huang, H.-J., Ramaswamy, S., Al-Dajani, W., Tschirner, U., Cairncross, R.A., 2009. Effect of biomass species and plant size on cellulosic ethanol: A comparative process and economic analysis. Biomass Bioenergy 33, 234–246. doi:10.1016/j.biombioe.2008.05.007

IARC, 2013. IARC: Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths (Press release No. 221). International Agency for Resaerch on Cancer, Lyon.

IEA, n.d. Bioenergy [WWW Document]. URL https://www.iea.org/topics/renewables/subtopics/bioenergy/ (accessed 8.6.17).

IPCC, 2005. Carbon Dioxide Capture and Storage (Special Report).

IPCC, 2006. Volume 4 - Agriculture, Forestry and Other land Use, in: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. & Tanabe K. (Eds). IGES, Japan.

IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A.(eds.)]. Geneva, Switzerland.

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)], IPCC. ed. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.

ISO, 2006a. ISO 14040:2006 - Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Principes et cadre (Norme ISO No. 14040–2006). International Standardisation Organisation.

ISO, 2006b. ISO 14044:2006 - Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Exigences et lignes directrices (Norme ISO No. 14044–2006). International Standardisation Organisation.

Johansson, T.B., Kelly, H., Reddy, A.K.N., Williams, R.H., 1993. Renewable Fuels and Electricity for a Growing World Economy: Defining and Achieving the Potential. Energy Stud. Rev. 4. doi:10.15173/esr.v4i3.284

Kc, S., Lutz, W., 2014. Demographic scenarios by age, sex and education corresponding to the SSP narratives. Popul. Environ. 35, 243–260. doi:10.1007/s11111-014-0205-4

Kendall, A., 2012. Time-adjusted global warming potentials for LCA and carbon footprints. Int. J. Life Cycle Assess. 17, 1042–1049. doi:10.1007/s11367-012-0436-5

Kent, T., Kofman, P.D., Coates, E., 2011. Harvesting wood for energy - Cost-effective woodfuel supply chains in Irish forestry. COFORD, Dublin.

Khanna, M., Dhungana, B., Clifton-Brown, J., 2008. Costs of producing miscanthus and switchgrass for bioenergy in Illinois. Biomass Bioenergy 32, 482–493. doi:10.1016/j.biombioe.2007.11.003

Kolström, M., 1998. Ecological simulation model for studying diversity of stand structure in boreal forests. Ecol. Model. 111, 17–36. doi:10.1016/S0304-3800(98)00102-1

Kshirsagar, M.P., Kalamkar, V.R., 2014. A comprehensive review on biomass cookstoves and a systematic approach for modern cookstove design. Renew. Sustain. Energy Rev. 30, 580–603. doi:10.1016/j.rser.2013.10.039

Laitila, J., 2008. Harvesting technology and the cost of fuel chips from early thinnings. Silva Fenn. Finn. Soc. For. Sci. 42, 267–283.

Laitila, J., Heikkilä, J., Anttila, P., 2010. Harvesting alternatives, accumulation and procurement cost of small-diameter thinning wood for fuel in Central Finland. Silva Fenn. Finn. Soc. For. Sci. 44, 465–480.

Landsberg, J.J., Waring, R.H., 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. For. Ecol. Manag. 95, 209–228. doi:10.1016/S0378-1127(97)00026-1

Lapola, D.M., Schaldach, R., Alcamo, J., Bondeau, A., Koch, J., Koelking, C., Priess, J.A., 2010. Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. Proc. Natl. Acad. Sci. 200907318. doi:10.1073/pnas.0907318107

Leinonen, A., 2007. Wood Chip Production Technology and Costs for Fuel in Namibia (VTT Research Notes No. 2417). VTT.

Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M., Brandão, M., Samson, R., 2012. Assessing temporary carbon sequestration and storage projects through land use, land-use change and forestry: comparison of dynamic life cycle assessment with ton-year approaches. Clim. Change 115, 759–776. doi:10.1007/s10584-012-0473-x

Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M., Deschênes, L., Samson, R., 2010. Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments. Environ. Sci. Technol. 44, 3169–3174. doi:10.1021/es9030003

Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M., Samson, R., 2013. Biogenic Carbon and Temporary Storage Addressed with Dynamic Life Cycle Assessment. J. Ind. Ecol. 17, 117–128. doi:10.1111/j.1530-9290.2012.00503.x

Levasseur, P., 2006. L'expérience allemande de la méthanisation à la ferme: transposition au contexte français. TechniPorc 29, 13–20.

Lewandowski, I., Weger, J., van Hooijdonk, A., Havlickova, K., van Dam, J., Faaij, A., 2006. The potential biomass for energy production in the Czech Republic. Biomass Bioenergy 30, 405–421. doi:10.1016/j.biombioe.2005.11.020

Loiseau, E., 2014. Elaboration d'une démarche d'évaluation environnementale d'un territoire basée sur le cadre méthodologique de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV): application au territoire du Bassin de Thau (Thèse de doctorat). Université de Montpellier, Montpellier.

Lotze-Campen, H., Popp, A., Beringer, T., Müller, C., Bondeau, A., Rost, S., Lucht, W., 2010. Scenarios of global bioenergy production: The trade-offs between agricultural expansion, intensification and trade. Ecol. Model. 221, 2188–2196. doi:10.1016/j.ecolmodel.2009.10.002

Loustau, D., Moreaux, V., Bosc, A., Trichet, P., Kumari, J., Rabemanantsoa, T., Balesdent, J., Jolivet, C., Medlyn, B.E., Cavaignac, S., Nguyen-The, N., 2012. A climate sensitive model of carbon transfer through atmosphere, vegetation and soil in managed forest ecosystems. Presented at the AGU Fall Meeting, San Francisco.

McIlveen-Wright, D.R., Huang, Y., Rezvani, S., Redpath, D., Anderson, M., Dave, A., Hewitt, N.J., 2013. A technical and economic analysis of three large scale biomass combustion plants in the UK. Appl. Energy 112, 396–404. doi:10.1016/j.apenergy.2012.12.051

Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, W.W.I., 1992. Halte à la croissance: les limites de la croissance. Club de Rome.

Melkior, T., Jacob, S., Gerbaud, G., Hediger, S., Le Pape, L., Bonnefois, L., Bardet, M., 2012. NMR analysis of the transformation of wood constituents by torrefaction. Fuel 92, 271–280. doi:10.1016/j.fuel.2011.06.042

Mendu, V., Shearin, T., Campbell, J.E., Stork, J., Jae, J., Crocker, M., Huber, G., DeBolt, S., 2012. Global bioenergy potential from high-lignin agricultural residue. Proc. Natl. Acad. Sci. 109, 4014–4019. doi:10.1073/pnas.1112757109

Météo-France, n.d. Les modèles de prévision de Météo-France [WWW Document]. URL http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/la-prevision-du-temps/les-modeles-de-prevision-de-meteo-france (accessed 7.10.17).

Ministère de l'Économie et des Finances, 2015. IR - Crédit d'impôt pour la transition énergétique (Tax credit for the energy transition). Bull. Off. Financ. Publiques-Impôts.

Ministère de l'Environnement, 2009. Arrêté du 15 septembre 2009 relatif à l'entretien annuel des chaudières dont la puissance nominale est comprise entre 4 et 400 kilowatts.

Moguédec, G.L., Dhôte, J.-F., 2012. Fagacées: a tree-centered growth and yield model for sessile oak (Quercus petraea L.) and common beech (Fagus sylvatica L.). Ann. For. Sci. 69, 257–269. doi:10.1007/s13595-011-0157-0

Monti, A., Fazio, S., Lychnaras, V., Soldatos, P., Venturi, G., 2006. A full economic analysis of switchgrass under different scenarios in Italy estimated by BEE model. Biomass Bioenergy 31, 177–185.

Muratori, M., Calvin, K., Wise, M., Kyle, P., Edmonds, J., 2016. Global economic consequences of deploying bioenergy with carbon capture and storage (BECCS). Environ. Res. Lett. 11, 095004. doi:10.1088/1748-9326/11/9/095004

Murphy, R., Woods, J., Black, M., McManus, M., 2011. Global developments in the competition for land from biofuels. Food Policy 36, Supplement 1, S52–S61. doi:10.1016/j.foodpol.2010.11.014

Nitschelm, L., Aubin, J., Corson, M.S., Viaud, V., Walter, C., 2016. Spatial differentiation in Life Cycle Assessment LCA applied to an agricultural territory: current practices and method development. J. Clean. Prod. 112, 2472–2484. doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.138

Nussbaumer, T., 2003. Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. Energy Fuels 17, 1510–1521. doi:10.1021/ef030031q

O'Brien, J., Mak, K., 2004. Economic parameters for estimating the delivered wood cost in the Deh Cho planning area. Meyers Norris Penny LLP, Alberta, Canada.

Observatoire économique de France Bois Forêt, 2014. Analyse des marchés forestiers 2013-2014.

Owen, D., 1956. Tables for computing bivariate normal probabilities. Ann. Math. Stat. 27, 1075–1090.

Ozgen, S., Caserini, S., Galante, S., Giugliano, M., Angelino, E., Marongiu, A., Hugony, F., Migliavacca, G., Morreale, C., 2014. Emission factors from small scale appliances burning wood and pellets. Atmos. Environ. 94, 144–153. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.05.032

Parlement Européen, 2009. DIRECTIVE 2009/28/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE, 2009/28/CE.

Pecenka, R., Hoffmann, T., 2015. Harvest technology for short rotation coppices and costs of harvest, transport and storage. Agron. Res. 13, 361–371.

Pelletier, C., François, J., Bosc, A., Picart, D., Moisy, C., Loustau, D., Fortin, M., Rogaume, Y., Dieckhoff, L., Brunelle, T., Dumas, P., Pons, M.-N., Dufour, A., 2016. Environmental and economic assessment of converting wood to energy, based on modelling of the entire production chain. Presented at the EUBCE2016, Amsterdam.

Pelletier, C., Francois, J., Dieckhoff, L., Fortin, M., Rogaume, Y., Pons, M.-N., Dufour, A., 2015. Assessment of biomass-to-energy chains from the forest to the combustion in individual or district heating boilers. Presented at the ECOS2015, Pau.

Petersen Raymer, A.K., 2006. A comparison of avoided greenhouse gas emissions when using different kinds of wood energy. Biomass Bioenergy 30, 605–617. doi:10.1016/j.biombioe.2006.01.009

Pichancourt, J.-B., Manso, R., Ningre, F., Fortin, M., soumis. A carbon accounting tool for complex and uncertain greenhouse gas emission life-cycles. Environ. Model. Softw.

Popp, A., Dietrich, J.P., Lotze-Campen, H., Klein, D., Bauer, N., Krause, M., Tim Beringer, Gerten, D., Edenhofer, O., 2011. The economic potential of bioenergy for climate change mitigation with special attention given to implications for the land system. Environ. Res. Lett. 6, 034017. doi:10.1088/1748-9326/6/3/034017

Powell, T.W.R., Lenton, T.M., 2012. Future carbon dioxide removal via biomass energy constrained by agricultural efficiency and dietary trends. Energy Environ. Sci. 5, 8116–8133. doi:10.1039/C2EE21592F

Premier Ministre, 1996. Code général des collectivités territoriales - Article L2213-26, Code général des collectivités territoriales.

Premier ministre, Ministère de l'emploi, de la cohésion sociale et du logement, Ministère de l'Économie et des Finances, 2006. Décret n° 2006-592 du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions, 2006-592.

Prix Fioul, n.d. Prix du fioul domestique en France [WWW Document]. URL http://prixfioul.fr/ (accessed 9.9.16).

Profft, I., Mund, M., Weber, G.-E., Weller, E., Schulze, E.-D., 2009. Forest management and carbon sequestration in wood products. Eur. J. For. Res. 128, 399–413. doi:10.1007/s10342-009-0283-5

Rialland, S., Planchet, L., 2011. Production de plaquettes forestières en région Pays de la Loire. Atlanbois, Nantes, France.

RIVM, n.d. LCIA: the ReCiPe model - RIVM [WWW Document]. URL http://www.rivm.nl/en/Topics/L/Life_Cycle_Assessment_LCA/ReCiPe (accessed 7.12.17).

Robert, L., 2006. Caractérisation des émissions issues de la combustion du bois dans deux appareils indépendants. Pollut. Atmos. 65–78. doi:http://dx.doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.1501

Rogaume, Y., 2005a. Production de chaleur à partir du bois - Combustible et appareillage. Tech. Ing.

Rogaume, Y., 2005b. Production de chaleur à partir du bois - installations industrielles. Tech. Ing.

Rogaume, Y., 2008. Amélioration des performances environnementales et de l'intégration dans l'habitat des équipements de chauffage domestique au bois (Rapport d'étude). ADEME.

Rogaume, Y., 2010. Estimation de l'impact environnemental du chauffage domestique au bois à l'échelle locale (quartier, village) (Rapport d'étude). ADEME.

Rogaume, Y., 2014. Communication personnelle : les facteurs d'air des différentes technologies de combustion.

Rokityanskiy, D., Benítez, P.C., Kraxner, F., McCallum, I., Obersteiner, M., Rametsteiner, E., Yamagata, Y., 2007. Geographically explicit global modeling of land-use change, carbon sequestration, and biomass supply. Technol. Forecast. Soc. Change, Greenhouse Gases - Integrated Assessment 74, 1057–1082. doi:10.1016/j.techfore.2006.05.022

Rose, S.K., Kriegler, E., Bibas, R., Calvin, K., Popp, A., Vuuren, D.P. van, Weyant, J., 2013. Bioenergy in energy transformation and climate management. Clim. Change 1–17. doi:10.1007/s10584-013-0965-3

Rotheneder, E., 2012. Forestry and Bioenergy - Harvesting and wood fuel production.

Routa, J., Kellomäki, S., Kilpeläinen, A., Peltola, H., Strandman, H., 2011. Effects of forest management on the carbon dioxide emissions of wood energy in integrated production of timber and energy biomass. GCB Bioenergy 3, 483–497. doi:10.1111/j.1757-1707.2011.01106.x

Schakel, W., Meerman, H., Talaei, A., Ramírez, A., Faaij, A., 2014. Comparative life cycle assessment of biomass co-firing plants with carbon capture and storage. Appl. Energy 131, 441–467. doi:10.1016/j.apenergy.2014.06.045

Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R.A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., Yu, T.-H., 2008. Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. Science 319, 1238–1240. doi:10.1126/science.1151861

Selectra, n.d. Tarif de l'abonnement gaz chez GDF Suez et ses concurrents [WWW Document]. URL http://tarifgaz.com/faq-quel-tarif/abonnement-gdf-suez-et-concurrents (accessed 9.9.16).

Shine, K.P., Fuglestvedt, J.S., Hailemariam, K., Stuber, N., 2005. Alternatives to the Global Warming Potential for Comparing Climate Impacts of Emissions of Greenhouse Gases. Clim. Change 68, 281–302. doi:10.1007/s10584-005-1146-9

Shorack, G.R., Wellner, J.A., 2009. Empirical Processes With Applications to Statistics. Society for Industrial & Applied Mathematics, Philadelphie.

Sikkema, R., Junginger, M., McFarlane, P., Faaij, A., 2013. The GHG contribution of the cascaded use of harvested wood products in comparison with the use of wood for energy—A case study on available forest resources in Canada. Environ. Sci. Policy 31, 96–108. doi:10.1016/j.envsci.2013.03.007

Siyu Chen, 2009. Life Cycle Assessment of Wood Pellet (Master of Science Thesis). Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Smeets, E.M.W., Faaij, A.P.C., 2007. Bioenergy potentials from forestry in 2050. Clim. Change 81, 353–390. doi:10.1007/s10584-006-9163-x

Smeets, E.M.W., Faaij, A.P.C., Lewandowski, I.M., Turkenburg, W.C., 2007. A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050. Prog. Energy Combust. Sci. 33, 56–106. doi:10.1016/j.pecs.2006.08.001

Smeets, E.M.W., Lewandowski, I.M., Faaij, A.P.C., 2009. The economical and environmental performance of miscanthus and switchgrass production and supply chains in a European setting. Renew. Sustain. Energy Rev. 13, 1230–1245. doi:10.1016/j.rser.2008.09.006

Smidt, M., Gallagher, T., 2013. Factors affecting fuel consumption and harvesting costs. Presented at the 38th Council on Forest Engineering Annual Meeting, Missoula, Montana, p. 8.

Solli, C., Reenaas, M., Strømman, A.H., Hertwich, E.G., 2009. Life cycle assessment of wood-based heating in Norway. Int. J. Life Cycle Assess. 14, 517–528. doi:10.1007/s11367-009-0086-4

Souty, F., Brunelle, T., Dumas, P., Dorin, B., Ciais, P., Crassous, R., Müller, C., Bondeau, A., 2012. The Nexus Land-Use model version 1.0, an approach articulating biophysical potentials and economic dynamics to model competition for land-use. Geosci Model Dev 5, 1297–1322. doi:10.5194/gmd-5-1297-2012

Spinelli, R., Hartsough, B.R., Owende, P.M.O., Ward, S.M., 2002. Productivity and Cost of Mechanized Whole-Tree Harvesting of Fast-Growing Eucalypt Stands. Int. J. For. Eng. 13.

Stanford University, n.d. EMF 33: Bio-Energy and Land Use | Energy Modeling Forum [WWW Document]. URL https://emf.stanford.edu/projects/emf-33-bio-energy-and-land-use (accessed 8.6.17).

Stevanovic, T., Perrin, D., 2009. Chimie du bois. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR).

Styles, D., Thorne, F., Jones, M.B., 2008. Energy crops in Ireland: An economic comparison of willow and Miscanthus production with conventional farming systems. Biomass Bioenergy 32, 407–421. doi:10.1016/j.biombioe.2007.10.012

Sun, Y., Cheng, J., 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. Bioresour. Technol., Reviews Issue 83, 1–11. doi:10.1016/S0960-8524(01)00212-7

The Danish EPA, 2005. Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment - The EDIP2003 methodology. Danish Ministry of the Environment - Environmental Protection Agency.

Thornley, P., Gilbert, P., Shackley, S., Hammond, J., 2015. Maximizing the greenhouse gas reductions from biomass: The role of life cycle assessment. Biomass Bioenergy 81, 35–43. doi:10.1016/j.biombioe.2015.05.002

Thorsell, S., Epplin, F.M., Huhnke, R.L., Taliaferro, C.M., 2004. Economics of a coordinated biorefinery feedstock harvest system: lignocellulosic biomass harvest cost. Biomass Bioenergy 27, 327–337. doi:10.1016/j.biombioe.2004.03.001

Tickle, P.K., Coops, N.C., Hafner, S.D., 2001. Assessing forest productivity at local scales across a native eucalypt forest using a process model, 3PG-SPATIAL. For. Ecol. Manag. 152, 275–291. doi:10.1016/S0378-1127(00)00609-5

Tillman, A.-M., 2000. Significance of decision-making for LCA methodology. Environ. Impact Assess. Rev. 20, 113–123. doi:10.1016/S0195-9255(99)00035-9

Tonini, D., Astrup, T., 2012. LCA of biomass-based energy systems: A case study for Denmark. Appl. Energy 99, 234–246. doi:10.1016/j.apenergy.2012.03.006

Tran-Ha, M., Perrotte, G., Cordonnier, T., Duplat, P., 2007. Volume tige d'un arbre ou d'une collection d'arbres pour six essences principales en France. Rev. For. Fr. 609–624.

Tuomi, M., Thum, T., Järvinen, H., Fronzek, S., Berg, B., Harmon, M., Trofymow, J.A., Sevanto, S., Liski, J., 2009. Leaf litter decomposition—Estimates of global variability based on Yasso07 model. Ecol. Model. 220, 3362–3371. doi:10.1016/j.ecolmodel.2009.05.016

Tuomi, M., Vanhala, P., Karhu, K., Fritze, H., Liski, J., 2008. Heterotrophic soil respiration—Comparison of different models describing its temperature dependence. Ecol. Model. 211, 182–190. doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.09.003

UICN, WWF, PNUE, 1980. Stratégie mondiale de la conservation: la conservation des ressources vivantes au service du développement durable.

UNFCCC, n.d. The Paris Agreement [WWW Document]. URL http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php (accessed 7.7.17).

Université de Leiden, n.d. CML-IA Characterisation Factors [WWW Document]. Leiden Univ. URL https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors (accessed 7.12.17).

US Inflation Calculator [WWW Document], n.d. . US Inflat. Calc. URL http://www.usinflationcalculator.com/ (accessed 4.20.17).

Vakil, C., Harvey, L., 2009. Human Health Implications of the Nuclear Energy Industry.

van Dam, J., Faaij, A.P.C., Hilbert, J., Petruzzi, H., Turkenburg, W.C., 2009. Large-scale bioenergy production from soybeans and switchgrass in Argentina: Part B. Environmental and socio-economic impacts on a regional level. Renew. Sustain. Energy Rev. 13, 1679–1709. doi:10.1016/j.rser.2009.03.012

van den Broek, R., Faaij, A., Wijk, A. van, Kent, T., Bulfin, M., Healion, K., Blaney, G., 1997. Willow firing in retrofitted Irish peat power plants. Biomass Bioenergy 12, 75–90. doi:10.1016/S0961-9534(96)00070-0

van den Broek, R., Teeuwisse, S., Healion, K., Kent, T., van Wijk, A., Faaij, A., Turkenburg, W., 2001. Potentials for electricity production from wood in Ireland. Energy 26, 991–1013. doi:10.1016/S0360-5442(01)00050-0

van den Broek, R., van den Burg, T., van Wijk, A., Turkenburg, W., 2000. Electricity generation from eucalyptus and bagasse by sugar mills in Nicaragua: A comparison with fuel oil electricity generation on the basis of costs, macro-economic impacts and environmental emissions. Biomass Bioenergy 19, 311–335.

van den Broek, R., van Wijk, A., Turkenburg, W., 2002. Electricity from energy crops in different settings—a country comparison between Nicaragua, Ireland and the Netherlands. Biomass Bioenergy 22, 79–98. doi:10.1016/S0961-9534(01)00063-0

van Vuuren, D.P., Riahi, K., Moss, R., Edmonds, J., Thomson, A., Nakicenovic, N., Kram, T., Berkhout, F., Swart, R., Janetos, A., Rose, S.K., Arnell, N., 2012. A proposal for a new scenario

framework to support research and assessment in different climate research communities. Glob. Environ. Change 22, 21–35. doi:10.1016/j.gloenvcha.2011.08.002

van Vuuren, D.P., van Vliet, J., Stehfest, E., 2009. Future bio-energy potential under various natural constraints. Energy Policy 37, 4220–4230. doi:10.1016/j.enpol.2009.05.029

Walsh, M.E., 1998. U.S. bioenergy crop economic analyses: status and needs. Biomass Bioenergy 14, 341–350. doi:10.1016/S0961-9534(97)10070-8

Weidema, B.P., 1993. Development of a Method for Product Life Cycle Assessment with Special References to Food Products (PhD thesis). technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.

Wilson, T.O., McNeal, F.M., Spatari, S., G. Abler, D., Adler, P.R., 2012. Densified Biomass Can Cost-Effectively Mitigate Greenhouse Gas Emissions and Address Energy Security in Thermal Applications. Environ. Sci. Technol. 46, 1270–1277. doi:10.1021/es202752b

Wise, M., Calvin, K., Thomson, A., Clarke, L., Bond-Lamberty, B., Sands, R., Smith, S.J., Janetos, A., Edmonds, J., 2009. Implications of limiting CO2 concentrations for land use and energy. Science 324, 1183–1186. doi:10.1126/science.1168475

Wolf, J., Bindraban, P.., Luijten, J.., Vleeshouwers, L.., 2003. Exploratory study on the land area required for global food supply and the potential global production of bioenergy. Agric. Syst. 76, 841–861. doi:10.1016/S0308-521X(02)00077-X

Annexes

Annexe I. Publications et interventions orales

Articles publiés

La forêt : stock de carbone ou source d'énergie ? Mathieu Fortin, Chloé Pelletier, Jessica François, Anthony Dufour. Revue Forestière Française n°2, 2016, p. 133–142. DOI : 10.4267/2042/61862

Interventions en conférence

Juin 2015, Pau (France) ; 28th international conference on Efficiency, Cost Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS205) ; « Assessment of biomass-to-energy chains from the forest to the combustion in individual or district heating boilers" [Pelletier et al., 2015]

Juin 2016, Amsterdam (Pays-Bas); 24th European Biomass Conference and Exhibition; "Environmental and economic assessment of converting wood to energy, based on modelling of the entire production chain" [Pelletier et al., 2016]

Annexe II. Analyses ACV sur la biomasse-énergie dans la littérature

Tableau 28: Etudes ACV portant sur l'utilisation de la biomasse comme source d'énergie

Source	Scénarios étudiés	Unité fonctionnelle	Méthodologie ICV	Impacts environnementaux considérés	Méthode d'évaluation des impacts	Points forts de l'étude	Points faibles de l'étude
[Berndes et al., 2001]	Production d'électricité, de méthanol, et d'hydrogène à partir d'herbes pérennes ou de taillis à courte rotation	MJ d'électricité, méthanol ou hydrogène	A partir de la littérature, évaluation des rendements énergétiques, des besoins en eau et en travail pour produire de la bioénergie à grande échelle (200 EJ/an)	Consommation en eau	N/A	Evaluation à grande échelle des besoins en eau ; évaluation des besoins en travail	A cause de l'échelle considérée, les rendements de production et les chiffres de consommation sont des moyennes globales, les résultats peuvent seulement être considérés comme indicatifs.
[Bright et al., 2010]	A partir d'excédent forestier et de résidus de scierie, production de biocarburants selon plusieurs scénarios de substitution	Excédent forestier de la Norvège	Inventaire établi à partir de tables entrées-sorties pour la Norvège et l'Union Européenne	Pour l'analyse de scénarios, émissions de GES uniquement ; à l'échelle de l'unité de production, les autres impacts de la méthode CML sont inclus	Méthode CML 2001 [EarthShift, n.d.]	Calcul du potentiel d'abattement des émissions de GES à l'échelle d'un pays	Pas de prise en compte du temps de croissance dans le facteur de caractérisation du CO_2

Source	Scénarios étudiés	Unité fonctionnelle	Méthodologie ICV	Impacts environnementaux considérés	Méthode d'évaluation des impacts	Points forts de l'étude	Points faibles de l'étude
[Caserini et al., 2010]	Combustion de bois dans différents équipements individuels ainsi que dans des réseaux de chaleur	1 tonne de biomasse sèche	Données de la littérature	Réchauffement climatique, toxicité humaine, Acidification, Formation d'oxydants photochimiques	CML 2001	Comparaison de plusieurs technologies de combustion	
[Cespi et al., 2013]	Comparaison de la combustion en poêle à bûches et en poêle à granulés	MJ de chaleur produite	Poêles modélisés selon les données sur les Meilleures technologies Disponibles ; autres données issues de la littérature et de la base de données EcoInvent	Formation de particules, Toxicité humaine, Réchauffement climatique, Epuisement des ressources fossiles	ReCiPe 1.07	Intégration de la phase de fabrication des poêles, modélisation de la combustion	
[Cherubini et al., 2011]	Combustion de bois issu de forêts boréales sous différents itinéraires de gestion sylvicole	Parcelle de forêt	Modélisation de la croissance de la forêt par une fonction simple	Facteur de caractérisation du CO_2 biogénique en fonction du scénario sylvicole	Calcul dynamique du potentiel de réchauffement absolu	Calcul dynamique de l'impact CO_2	Etude théorique qui fournit un cadre et une méthode d'analyse ; pas d'application à un cas concret

Source	Scénarios étudiés	Unité fonctionnelle	Méthodologie ICV	Impacts environnementaux considérés	Méthode d'évaluation des impacts	Points forts de l'étude	Points faibles de l'étude
[Dornburg & Faaij, 2001]	Comparaison de différents systèmes pour la production de chaleur et/ou d'électricité par combustion ou gazéification de résidus de bois	GJ de chaleur ou d'électricité	A partir de la littérature	Economies d'énergie primaire fossile	N/A	Etude des facteurs d'échelle des installations ; aspects économiques traités	Un seul impact considéré, l'efficacité énergétique
[Eriksson et al., 2007]	Réseau de chaleur alimenté par l'incinération de déchets, la combustion de bois ou la combustion de gaz naturel	MJ de chaleur	ICV conséquentiel ; modèle de gestion des déchets développé par [Bjoerklund et al., 2003]; facteurs d'émission de l'incinération issus du modèle ORWARE [Eriksson et al., 2002] ; données sur la production de chaleur à partir de bois issues de [Finnveden et al., 2005]	Tous les facteurs de caractérisation de la méthode CML 2001	CML 2001	Comparaison de plusieurs alternatives pour la récupération d'énergie, la production d'électricité et le traitement des déchets	Les débouchés alternatifs du bois et du gaz naturel n'ont pas pu être identifiés, l'aspect conséquentiel est donc limité à la production d'électricité

Source	Scénarios étudiés	Unité fonctionnelle	Méthodologie ICV	Impacts environnementaux considérés	Méthode d'évaluation des impacts	Points forts de l'étude	Points faibles de l'étude
[Guest et al., 2011]	Production d'électricité et de chaleur résidentielle à partir de forêts – étude de plusieurs tailles de centrales	1 MJ d'électricité et 1 MJ de chaleur, livrés	Facteurs issus de la littérature, de simulations informatiques et de la base de données EcoInvent [EcoInvent, n.d.]	Tous les facteurs de caractérisation de la méthode CML 2001	Méthode CML 2001 [EarthShift, n.d.]	Inclusion de l'ensemble de la chaîne de production, de la forêt à la distribution au consommateur final	CO_2 biogénique considéré comme neutre en termes de réchauffement climatique
[Guest et al., 2013]	Plusieurs scénarios d'exploitation des résidus forestiers alimentent la production d'électricité, de chauffage urbain ou de diesel	Résidus forestiers de Norvège	ICV conséquentiel sur le remplacement d'énergies fossiles Modèle de carbone dans le sol Yasso07 [Tuomi et al., 2008, 2009]	Impact réchauffement climatique, potentiel de changement de température absolu (AGTP)	ACV dynamique	Approche dynamique, utilisation de la métrique température, prise en compte de la décomposition des résidus au sol	Pas de prise en compte de l'appauvrissement des sols suite à l'extraction des résidus.
[Giuntoli et al., 2015]	Combustion de résidus de forêts dans différents modèles de chaudières	1 MJ de chaleur utile	Données issues de la littérature	Réchauffement climatique, Acidification, Formation de particules, Formation d'oxydants photochimiques, Potentiel Absolu de Changement de Température (AGTP)	Facteurs de caractérisation de l'International Life cycle Dataset (ILCD)	Prise en compte des variations du stock de carbone de la forêt avec et sans exploitation des résidus ; analyse dynamique	

Source	Scénarios étudiés	Unité fonctionnelle	Méthodologie ICV	Impacts environnementaux considérés	Méthode d'évaluation des impacts	Points forts de l'étude	Points faibles de l'étude
[Hoefnagels et al., 2010]	Production de biocarburants à partir de différentes biomasses (1ère et 2ème générations)	2 unités comparées : 1 MJ de carburant, 1 ha de terre	Chaînes de production, rendements et émissions définis à partir de la littérature	Bilan énergétique, production de gaz à effet de serre (changement d'usage des sols direct et indirect inclus)	Facteurs de caractérisation des différents GES basés sur le 4ème rapport du GIEC [IPCC, 2007]	Comparaison de plusieurs systèmes de production de biocarburants ; étude de l'impact des paramètres d'allocation et des frontières du système	Pas de prise en compte du temps de séjour du CO_2 dans l'atmosphère (diminution de l'impact du changement d'usage des sols)
[Petersen Raymer, 2006]	Combustion de différentes formes de bois-énergie	1 m^3 de biomasse	A partir des données de producteurs d'énergie et de la littérature	Emissions de GES	Facteurs de caractérisation IPCC	Comparaison de six formes de bois : bûches, sciure, granulés, briquettes, bois de démolition, écorces	Un seul impact considéré ; l'étape de croissance n'est pas prise en compte.
[Routa et al., 2011]	Production d'énergie à partir de forêts de différentes essences et avec différents scénarios de gestion	MWh produit, ha exploité	Modélisation de la croissance de la forêt par le modèle SIMA [Kolström, 1998]; évaluation des émissions liées aux opérations forestières à partir de la littérature	Emissions de GES ramenées à la production énergétique sur 80 ans	N/A	Calcul des variations d'émissions liées à la gestion sylvicole selon le scénario	Pas d'aspect dynamique de l'impact des émissions sur le potentiel de réchauffement global

Source	Scénarios étudiés	Unité fonctionnelle	Méthodologie ICV	Impacts environnementaux considérés	Méthode d'évaluation des impacts	Points forts de l'étude	Points faibles de l'étude
[Schakel et al., 2014]	Co-combustion de charbon et de granulés de bois ou de paille dans deux types de centrales électriques, avec capture et stockage de carbone	1 kWh d'électricité livré au réseau	Données issues de la littérature	Tous les impacts de la méthode ReCiPe	ReCiPe	Analyse de sensibilité sur une large gamme de paramètres	
[Solli et al., 2009]	Chauffage individuel par un poêle ancien ou moderne	1 kWh de chaleur utile	Utilisation de tables entrée-sortie pour la Norvège	Tous les facteurs de caractérisation de la méthode CML 2001	CML 2001	Comparaison de deux itérations d'une même technologie	
[Thornley et al., 2015]	Comparaison de plusieurs systèmes dont une chaudière à granulés et un réseau de chaleur à plaquettes	1 MWh de chaleur utile	Données issues de la littérature	Réchauffement climatique	Facteurs de caractérisation IPCC	Inclusion de toute la chaîne de production ; analyse économique en parallèle à l'analyse environnementale	

Source	Scénarios étudiés	Unité fonctionnelle	Méthodologie ICV	Impacts environnementaux considérés	Méthode d'évaluation des impacts	Points forts de l'étude	Points faibles de l'étude
[Tonini & Astrup, 2012]	Comparaison de plusieurs scénarios de production de biocarburants au Danemark, à l'horizon 2030 et 2050	Répondre à la demande en énergie du Danemark à l'horizon 2030 et 2050	Facteurs issus de la littérature	Tous les facteurs de caractérisation de la méthode EDIP 2003	EDIP 2003 [The Danish EPA, 2005]	Etude à l'échelle d'un pays, prise en compte du changement d'usage des sols	
[Wilson et al., 2012]	Chauffage individuel à granulés, chauffage collectif à briquettes	1 GJ de chaleur	Facteurs issus de la littérature	Emissions GES	Facteurs de caractérisation IPCC	Analyse économique mise en parallèle avec l'analyse environnementale	Le calcul des impacts suppose que le CO_2 biogénique est neutre par rapport au réchauffement climatique

Annexe III. Détails du modèle de combustion Aspen Plus®

Tableau 29: Blocs du modèle de combustion Aspen Plus

Bloc	Type de bloc	Fonction	Bloc(s) amont	Bloc(s) aval
Séparateur 1	Séparateur (Sep)	Sépare l'eau (H_2O) du bois anhydre (WOOD)	Aucun	Séparateur 2, Mélangeur 1
Séparateur 2	Séparateur (Sep)	Divise le flux d'H_2O entre évaporation et humidité résiduelle	Séparateur 1	Aucun, Mélangeur 1
Mélangeur 1	Mélangeur	Mélange le bois anhydre (WOOD) et l'humidité résiduelle	Séparateur 1, Séparateur 2	Mélangeur 2
Mélangeur 2	Mélangeur	Mélange le bois sec (WOOD + H_2O) et l'air (O_2 + N_2)	Mélangeur 1, Aucun	Réacteur de combustion
Réacteur de combustion	Réacteur (Ryield)	Utilise une sous-routine FORTRAN pour calculer l'arrivée d'air, la composition des fumées, la production de cendres et de chaleur	Mélangeur 1	Séparateur de cendres
Séparateur de cendres	Séparateur (Sep)	Sépare les cendres des fumées	Réacteur de combustion	Echangeur thermique, Aucun
Echangeur thermique	Echangeur thermique	Calcule la chaleur récupérée sur les fumées selon leur température de sortie	Séparateur de cendres	Aucun

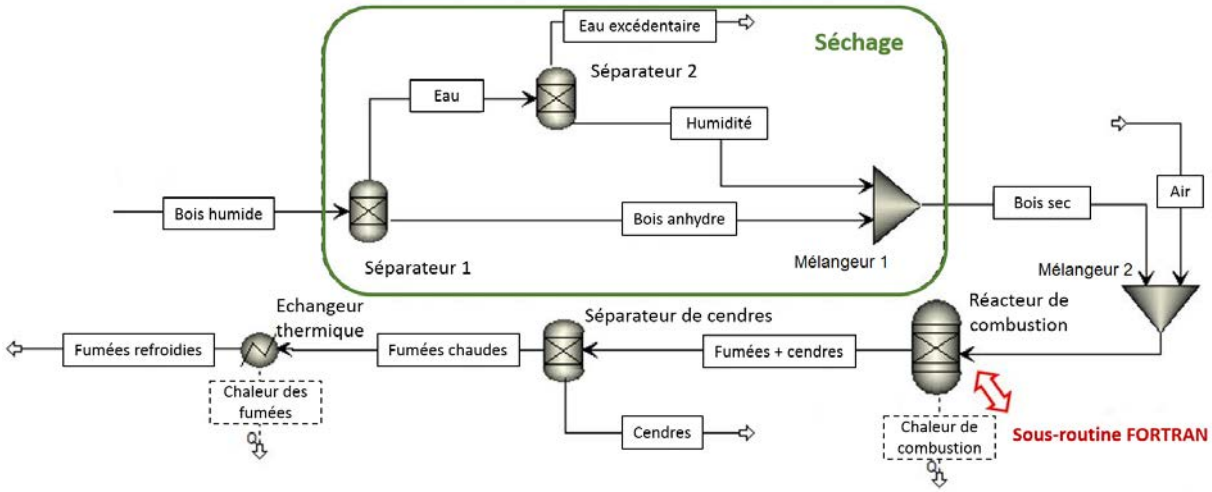


Figure 81: Modèle de combustion du bois sous Aspen Plus®

Annexe IV. Plans des scenarios analysés sous GaBi®

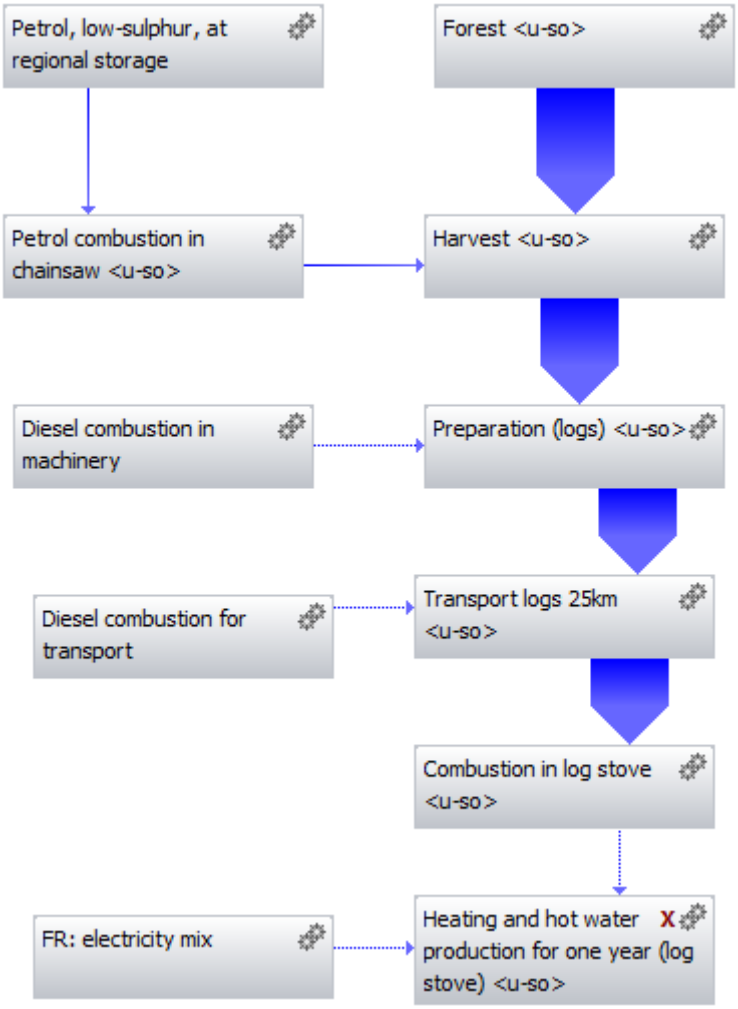


Figure 82: Plan GaBi - scénario poêle à bûches

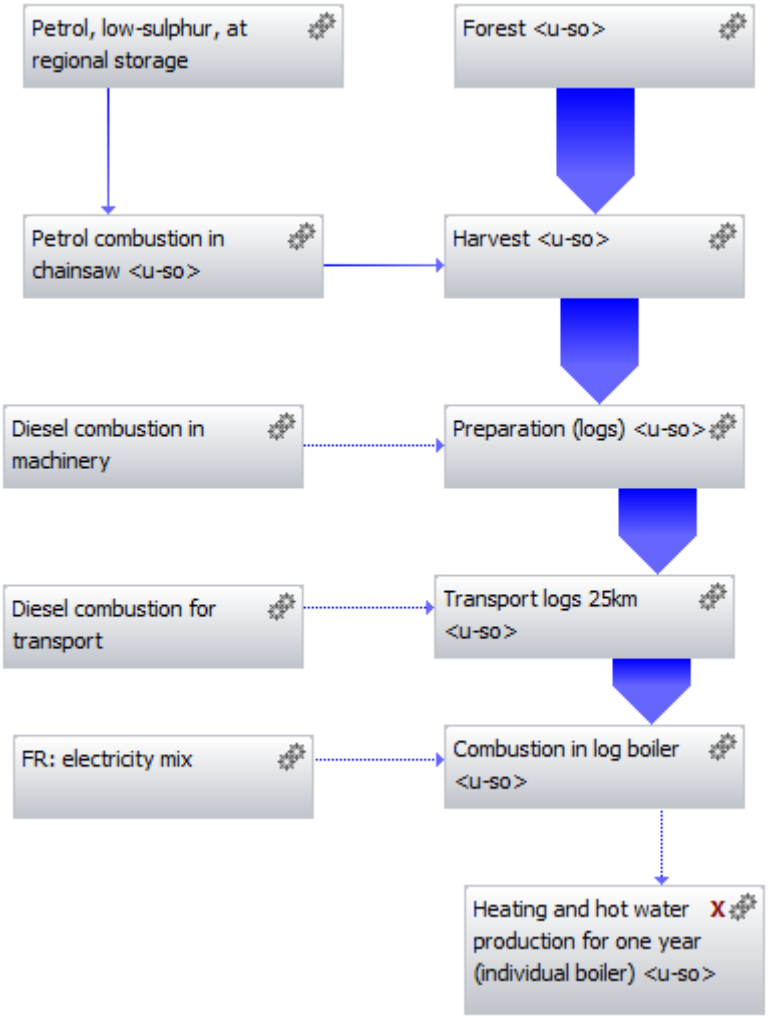


Figure 83: Plan GaBi - scénario chaudière à bûches

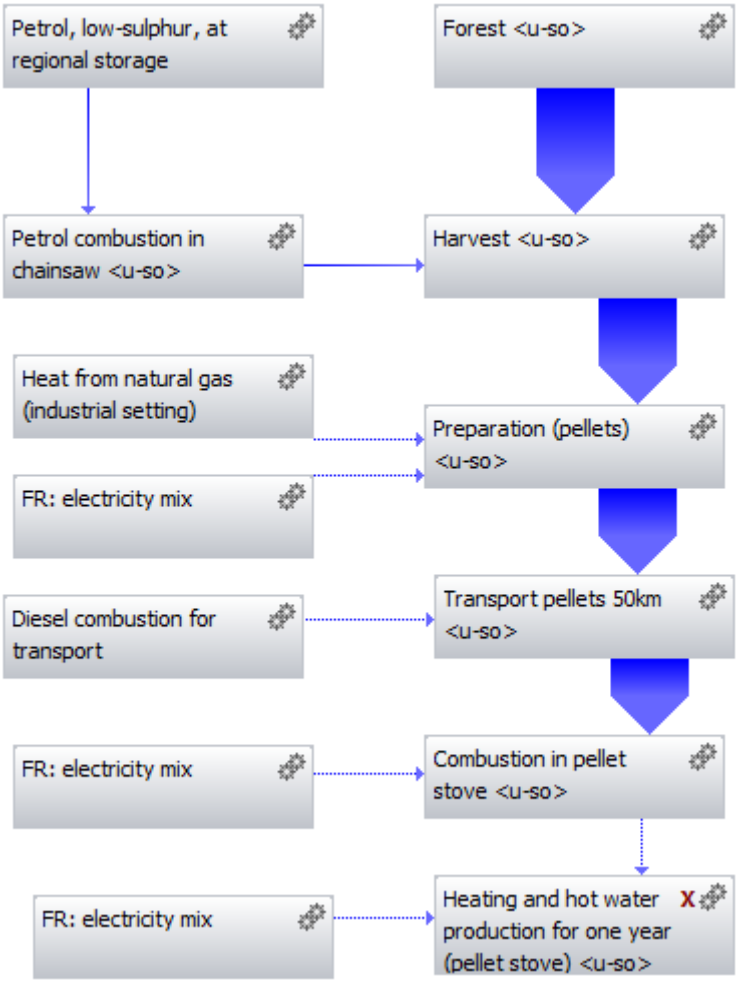


Figure 84: Plan GaBi - scénario poêle à granulés

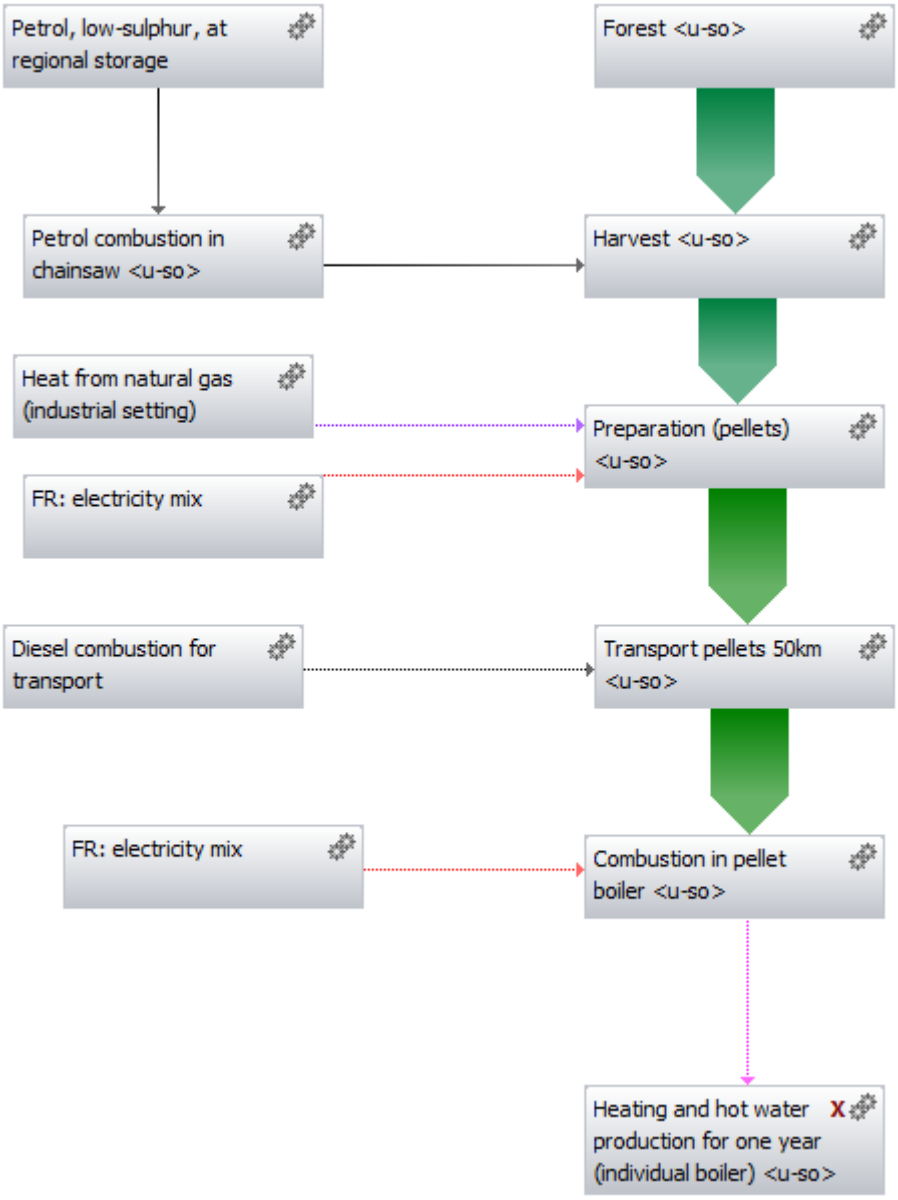


Figure 85: Plan GaBi - scénario chaudière à granulés

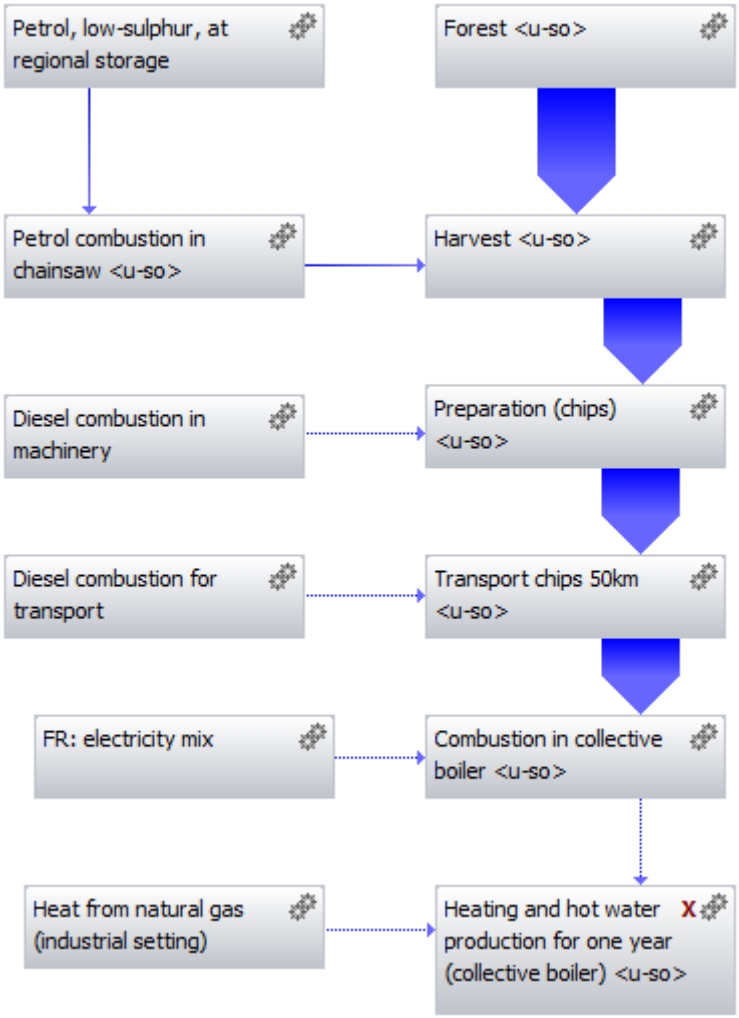


Figure 86: Plan GaBi - scénario réseau de chaleur à plaquettes forestières

Le module « Transport » peut être remplacé pour étudier l'effet de la distance sur les résultats ACV.

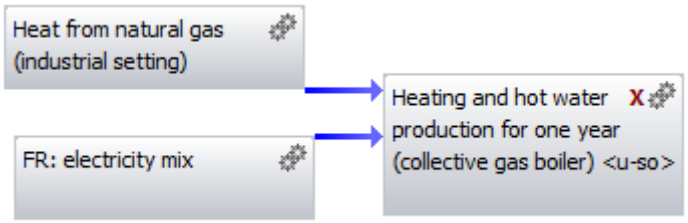


Figure 87: Plan GaBi - scénario réseau de chaleur au gaz naturel

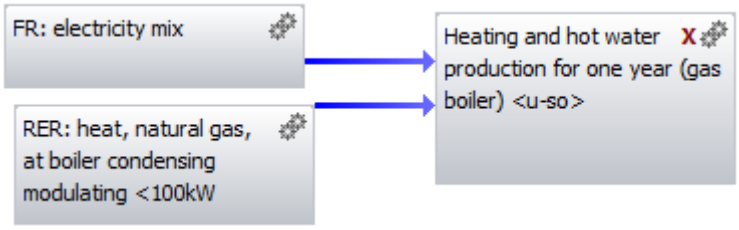


Figure 88: Plan GaBi - scénario chaudière individuelle au gaz naturel

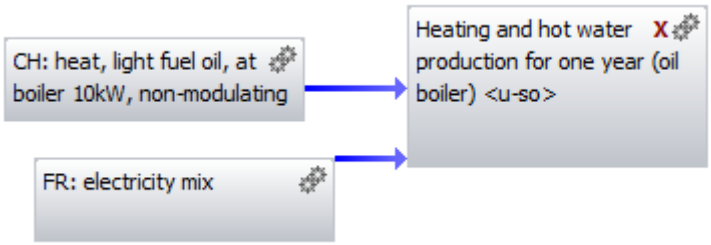


Figure 89: Plan GaBi - scénario chaudière individuelle au fioul

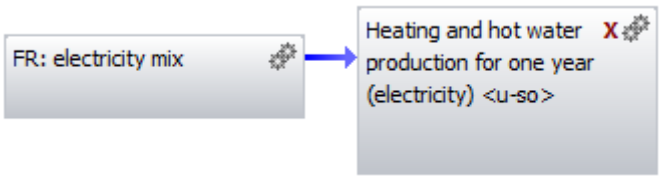


Figure 90: Plan GaBi - scénario chauffage électrique

Annexe V. Résultats détaillés de l'ACV GaBi®

Tableau 30: Résultats ACV détaillés - poêle à bûches (S2)

Log stove		Forest	Harvest		Preparation	Transport	Heating and hot water production	
Impact	Unité		Petrol, low-sulphur, at regional storage	Petrol combustion in chainsaw	Diesel combustion in machinery	Diesel combustion for transport	Wood combustion	French electricity mix
Climate change	kg CO_2 equiv		$2{,}18 \cdot 10^{01}$	$9{,}56 \cdot 10^{1}$	4,48	6,19	$1{,}91 \cdot 10^{3}$	$5{,}14 \cdot 10^{2}$
Terrestrial acidification	kg SO_2 equiv		$2{,}10 \cdot 10^{-1}$	$1{,}62 \cdot 10^{-1}$	$3{,}50 \cdot 10^{-2}$	$2{,}19 \cdot 10^{-2}$	2,54	2,68
Freshwater eutrophication	kg P equiv		$3{,}69 \cdot 10^{-3}$		$3{,}56 \cdot 10^{-4}$	$1{,}48 \cdot 10^{-4}$		$2{,}37 \cdot 10^{-1}$
Ozone depletion	kg CFC-11 equiv		$1{,}42 \cdot 10^{-5}$		$5{,}61 \cdot 10^{-7}$	$9{,}24 \cdot 10^{-7}$		$2{,}68 \cdot 10^{-5}$
Fossil depletion	kg oil equiv		$4{,}04 \cdot 10^{1}$		1,62	2,12		$1{,}41 \cdot 10^{2}$
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv		$1{,}01 \cdot 10^{-1}$	$2{,}27 \cdot 10^{-3}$	$1{,}15 \cdot 10^{-2}$	$4{,}67 \cdot 10^{-3}$	$4{,}29 \cdot 10^{-3}$	4,66
Human toxicity	kg 1,4-DB equiv		4,55	$7{,}18 \cdot 10^{-1}$	$4{,}05 \cdot 10^{-1}$	$2{,}87 \cdot 10^{-1}$	$5{,}73 \cdot 10^{1}$	$3{,}30 \cdot 10^{2}$
Ionising radiation	kg U235 equiv		2,63		$1{,}86 \cdot 10^{-1}$	$1{,}21 \cdot 10^{-1}$		$6{,}30 \cdot 10^{3}$
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv		$9{,}42 \cdot 10^{-2}$	$9{,}36 \cdot 10^{-4}$	$1{,}04 \cdot 10^{-2}$	$3{,}74 \cdot 10^{-3}$	$3{,}70 \cdot 10^{-2}$	3,71
Marine eutrophication	kg N equiv		$2{,}57 \cdot 10^{-2}$	$8{,}85 \cdot 10^{-2}$	$1{,}95 \cdot 10^{-2}$	$1{,}11 \cdot 10^{-2}$	$3{,}72 \cdot 10^{-1}$	$5{,}93 \cdot 10^{-1}$
Metal depletion	kg Fe equiv	$1{,}52 \cdot 10^{2}$	$5{,}08 \cdot 10^{-1}$		$4{,}54 \cdot 10^{-1}$	$2{,}38 \cdot 10^{-2}$		$2{,}91 \cdot 10^{1}$
Particulate matter formation	kg PM10 equiv		$5{,}73 \cdot 10^{-2}$	$6{,}57 \cdot 10^{-2}$	$1{,}78 \cdot 10^{-2}$	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	7,06	1,04
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC equiv		$1{,}24 \cdot 10^{-1}$	$4{,}25 \cdot 10^{-1}$	$5{,}89 \cdot 10^{-2}$	$3{,}97 \cdot 10^{-2}$	$2{,}24 \cdot 10^{1}$	1,64
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv		$8{,}85 \cdot 10^{-3}$	$9{,}33 \cdot 10^{-3}$	$4{,}38 \cdot 10^{-4}$	$9{,}79 \cdot 10^{-4}$	$7{,}47 \cdot 10^{-3}$	$1{,}15 \cdot 10^{-1}$
Water depletion	m^3	$6{,}91 \cdot 10^{-1}$	$2{,}62 \cdot 10^{1}$		3,25	1,25	$3{,}15 \cdot 10^{-1}$	$2{,}45 \cdot 10^{4}$

Tableau 31: Résultats ACV détaillés - poêle à granulés (S3)

Pellet stove		Forest	Harvest		Preparation		Transport	Heating and hot water production		
Impact	Unité		Petrol, low-sulphur, at regional storage	Petrol combustion in chainsaw	Heat from natural gas (industrial setting)	French electricity mix	Diesel combustion for transport	French electricity mix (combustion)	Wood combustion	French electricity mix
Climate change	kg CO_2 equiv		1,84·10	8,06·10	$3,71 \cdot 10^{2}$	1,79·10	9,18	2,07·10	$1,87 \cdot 10^{3}$	$3,98 \cdot 10^{2}$
Terrestrial acidification	kg SO_2 equiv		$1,77 \cdot 10^{-1}$	$1,37 \cdot 10^{-1}$	$3,15 \cdot 10^{-1}$	$9,32 \cdot 10^{-2}$	$3,25 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^{-1}$	2,65	2,07
Freshwater eutrophication	kg P equiv		$3,11 \cdot 10^{-3}$		$1,54 \cdot 10^{-2}$	$8,25 \cdot 10^{-3}$	$2,19 \cdot 10^{-4}$	$9,53 \cdot 10^{-3}$		$1,83 \cdot 10^{-1}$
Ozone depletion	kg CFC-11 equiv		$1,20 \cdot 10^{-5}$		$5,24 \cdot 10^{-5}$	$9,31 \cdot 10^{-7}$	$1,37 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$		$2,07 \cdot 10^{-5}$
Fossil depletion	kg oil equiv		3,40·10		$1,52 \cdot 10^{2}$	4,91	3,15	5,67		$1,09 \cdot 10^{2}$
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv		$8,48 \cdot 10^{-2}$	$1,92 \cdot 10^{-3}$	$2,38 \cdot 10^{-1}$	$1,62 \cdot 10^{-1}$	$6,93 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-1}$	$2,61 \cdot 10^{-4}$	3,61
Human toxicity	kg 1,4-DB equiv		3,84	$6,05 \cdot 10^{-1}$	1,26·10	1,15·10	$4,26 \cdot 10^{-1}$	1,33·10	1,94	$2,55 \cdot 10^{2}$
Ionising radiation	kg U235 equiv		2,21		1,12·10	$2,19 \cdot 10^{2}$	$1,80 \cdot 10^{-1}$	$2,53 \cdot 10^{2}$		$4,88 \cdot 10^{3}$
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv		$7,94 \cdot 10^{-2}$	$7,89 \cdot 10^{-4}$	$2,64 \cdot 10^{-1}$	$1,29 \cdot 10^{-1}$	$5,55 \cdot 10^{-3}$	$1,49 \cdot 10^{-1}$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	2,87
Marine eutrophication	kg N equiv		$2,16 \cdot 10^{-2}$	$7,45 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-1}$	$2,06 \cdot 10^{-2}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$	$2,38 \cdot 10^{-2}$	$6,68 \cdot 10^{-1}$	$4,59 \cdot 10^{-1}$
Metal depletion	kg Fe equiv	$1,28 \cdot 10^{2}$	$4,28 \cdot 10^{-1}$		1,73	1,01	3,53·10-2	1,17		2,25·10
Particulate matter formation	kg PM10 equiv		$4,83 \cdot 10^{-2}$	$5,54 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \cdot 10^{-1}$	$3,61 \cdot 10^{-2}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$4,17 \cdot 10^{-2}$	7,68	$8,03 \cdot 10^{-1}$
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC equiv		$1,05 \cdot 10^{-1}$	$3,58 \cdot 10^{-1}$	$4,01 \cdot 10^{-1}$	$5,71 \cdot 10^{-2}$	$5,90 \cdot 10^{-2}$	$6,60 \cdot 10^{-2}$	2,72	1,27
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv		$7,46 \cdot 10^{-3}$	$7,86 \cdot 10^{-3}$	$7,60 \cdot 10^{-3}$	$3,99 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$4,61 \cdot 10^{-3}$	$3,90 \cdot 10^{-4}$	$8,89 \cdot 10^{-2}$
Water depletion	m^3	$5,82 \cdot 10^{-1}$	2,21·10		$1,11 \cdot 10^{2}$	$8,50 \cdot 10^{2}$	1,86	$9,83 \cdot 10^{2}$	$1,06 \cdot 10^{-1}$	$1,89 \cdot 10^{4}$

Tableau 32: Résultats ACV détaillés - chaudière à bûches (S4)

Log boiler		Forest	Harvest		Preparation	Transport	Heating and hot water production	
Impact	Unité		Petrol, low-sulphur, at regional storage	Petrol combustion in chainsaw	Diesel combustion in machinery	Diesel combustion for transport	French electricity mix (combustion)	Wood combustion
Climate change	kg CO_2 equiv		3,92·10	$1,72 \cdot 10^{2}$	8,04	1,11·10	3,58·10	$3,90 \cdot 10^{3}$
Terrestrial acidification	kg SO_2 equiv		$3,77 \cdot 10^{-1}$	$2,92 \cdot 10^{-1}$	$6,28 \cdot 10^{-2}$	$3,93 \cdot 10^{-2}$	$1,86 \cdot 10^{-1}$	5,58
Freshwater eutrophication	kg P equiv		$6,62 \cdot 10^{-3}$		$6,40 \cdot 10^{-4}$	$2,66 \cdot 10^{-4}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$	
Ozone depletion	kg CFC-11 equiv		$2,56 \cdot 10^{-5}$		$1,01 \cdot 10^{-6}$	$1,66 \cdot 10^{-6}$	$1,86 \cdot 10^{-6}$	
Fossil depletion	kg oil equiv		7,25·10		2,91	3,81	9,81	
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv		$1,81 \cdot 10^{-1}$	$4,08 \cdot 10^{-3}$	$2,07 \cdot 10^{-2}$	$8,39 \cdot 10^{-3}$	$3,24 \cdot 10^{-1}$	$6,23 \cdot 10^{-4}$
Human toxicity	kg 1,4-DB equiv		8,17	1,29	$7,28 \cdot 10^{-1}$	$5,16 \cdot 10^{-1}$	2,30·10	8,35
Ionising radiation	kg U235 equiv		4,72		$3,33 \cdot 10^{-1}$	$2,17 \cdot 10^{-1}$	$4,38 \cdot 10^{2}$	
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv		$1,69 \cdot 10^{-1}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-2}$	$6,72 \cdot 10^{-3}$	$2,58 \cdot 10^{-1}$	$5,38 \cdot 10^{-3}$
Marine eutrophication	kg N equiv		$4,61 \cdot 10^{-2}$	$1,59 \cdot 10^{-1}$	$3,50 \cdot 10^{-2}$	$2,00 \cdot 10^{-2}$	$4,12 \cdot 10^{-2}$	1,38
Metal depletion	kg Fe equiv	$2,73 \cdot 10^{2}$	$9,13 \cdot 10^{-1}$		$8,15 \cdot 10^{-1}$	$4,27 \cdot 10^{-2}$	2,02	
Particulate matter formation	kg PM10 equiv		$1,03 \cdot 10^{-1}$	$1,18 \cdot 10^{-1}$	$3,20 \cdot 10^{-2}$	$1,89 \cdot 10^{-2}$	$7,22 \cdot 10^{-2}$	3,20
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC equiv		$2,24 \cdot 10^{-1}$	$7,64 \cdot 10^{-1}$	$1,06 \cdot 10^{-1}$	$7,14 \cdot 10^{-2}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$	9,23
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv		$1,59 \cdot 10^{-2}$	$1,68 \cdot 10^{-2}$	$7,88 \cdot 10^{-4}$	$1,76 \cdot 10^{-3}$	$7,99 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$
Water depletion	m^3	1,24	4,70·10		5,84	2,25	$1,70 \cdot 10^{3}$	$5,65 \cdot 10^{-1}$

Tableau 33: Résultats ACV détaillés - chaudière à granulés (S5)

Pellet boiler		Forest	Harvest		Preparation		Transport	Heating and hot water production	
Impact	Unité		Petrol, low-sulphur, at regional storage	Petrol combustion in chainsaw	Heat from natural gas (industrial setting)	French electricity mix	Diesel combustion for transport	French electricity mix (combustion)	Wood combustion
Climate change	kg CO_2 equiv		3,75·10	$1,64 \cdot 10^{2}$	$7,56 \cdot 10^{2}$	4,21·10	1,87·10	5,37·10	$3,83 \cdot 10^{3}$
Terrestrial acidification	kg SO_2 equiv		$3,61 \cdot 10^{-1}$	$2,79 \cdot 10^{-1}$	$6,42 \cdot 10^{-1}$	$2,20 \cdot 10^{-1}$	$6,62 \cdot 10^{-2}$	$2,80 \cdot 10^{-1}$	5,46
Freshwater eutrophication	kg P equiv		$6,33 \cdot 10^{-3}$		$3,13 \cdot 10^{-2}$	$1,94 \cdot 10^{-2}$	$4,47 \cdot 10^{-4}$	$2,48 \cdot 10^{-2}$	
Ozone depletion	kg CFC-11 equiv		$2,45 \cdot 10^{-5}$		$1,07 \cdot 10^{-4}$	$2,19 \cdot 10^{-6}$	$2,79 \cdot 10^{-6}$	$2,80 \cdot 10^{-6}$	
Fossil depletion	kg oil equiv		6,93·10		$3,11 \cdot 10^{2}$	1,16·10	6,42	1,47·10	
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv		$1,73 \cdot 10^{-1}$	$3,91 \cdot 10^{-3}$	$4,86 \cdot 10^{-1}$	$3,82 \cdot 10^{-1}$	$1,41 \cdot 10^{-2}$	$4,87 \cdot 10^{-1}$	$3,71 \cdot 10^{-6}$
Human toxicity	kg 1,4-DB equiv		7,82	1,23	2,58·10	2,70·10	$8,69 \cdot 10^{-1}$	3,45·10	$2,74 \cdot 10^{-2}$
Ionising radiation	kg U235 equiv		4,51		2,28·10	$5,16 \cdot 10^{2}$	$3,66 \cdot 10^{-1}$	$6,58 \cdot 10^{2}$	
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv		$1,62 \cdot 10^{-1}$	$1,61 \cdot 10^{-3}$	$5,38 \cdot 10^{-1}$	$3,04 \cdot 10^{-1}$	$1,13 \cdot 10^{-2}$	$3,87 \cdot 10^{-1}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$
Marine eutrophication	kg N equiv		$4,41 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-1}$	$2,18 \cdot 10^{-1}$	$4,85 \cdot 10^{-2}$	$3,36 \cdot 10^{-2}$	$6,19 \cdot 10^{-2}$	1,40
Metal depletion	kg Fe equiv	$2,61 \cdot 10^{2}$	$8,73 \cdot 10^{-1}$		3,52	2,38	$7,19 \cdot 10^{-2}$	3,04	
Particulate matter formation	kg PM10 equiv		$9,84 \cdot 10^{-2}$	$1,13 \cdot 10^{-1}$	$2,10 \cdot 10^{-1}$	$8,50 \cdot 10^{-2}$	$3,19 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^{-1}$	2,29·10
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC equiv		$2,14 \cdot 10^{-1}$	$7,31 \cdot 10^{-1}$	$8,17 \cdot 10^{-1}$	$1,35 \cdot 10^{-1}$	$1,20 \cdot 10^{-1}$	$1,72 \cdot 10^{-1}$	3,97
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv		$1,52 \cdot 10^{-2}$	$1,60 \cdot 10^{-2}$	$1,55 \cdot 10^{-2}$	$9,41 \cdot 10^{-3}$	$2,96 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$5,54 \cdot 10^{-6}$
Water depletion	m^3	1,19	4,50·10		$2,26 \cdot 10^{2}$	$2,00 \cdot 10^{3}$	3,79	$2,55 \cdot 10^{3}$	$2,16 \cdot 10^{-1}$

Tableau 34: Résultats ACV détaillés - réseau de chaleur au bois (S8)

Collective Boiler - local supply		Forest	Harvest		Preparation	Transport*	Heating and hot water production		
Impact	Unité		Petrol, low-sulphur, at regional storage	Petrol combustion in chainsaw	Diesel combustion in machinery	Diesel combustion for transport	French electricity mix (combustion)	Wood combustion	Heat from natural gas (industrial setting)
Climate change	kg CO_2 equiv		4,62·10	$2{,}02\cdot10^{2}$	$1{,}03\cdot10^{2}$	2,94·10	1,47	$4{,}44\cdot10^{3}$	$2{,}97\cdot10^{2}$
Terrestrial acidification	kg SO_2 equiv		$4{,}45\cdot10^{-1}$	$3{,}44\cdot10^{-1}$	$8{,}04\cdot10^{-1}$	$1{,}04\cdot10^{-1}$	$7{,}66\cdot10^{-3}$	2,96	$2{,}52\cdot10^{-1}$
Freshwater eutrophication	kg P equiv		$7{,}81\cdot10^{-3}$		$8{,}20\cdot10^{-3}$	$7{,}01\cdot10^{-4}$	$6{,}77\cdot10^{-4}$		$1{,}23\cdot10^{-2}$
Ozone depletion	kg CFC-11 equiv		3,02·10-5		$1{,}29\cdot10^{-5}$	$4{,}38\cdot10^{-6}$	$7{,}65\cdot10^{-8}$		$4{,}19\cdot10^{-5}$
Fossil depletion	kg oil equiv		8,55·10		3,72·10	1,01·10	$4{,}03\cdot10^{-1}$		$1{,}22\cdot10^{2}$
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv		2,13·10-1	$4{,}82\cdot10^{-3}$	$2{,}65\cdot10^{-1}$	$2{,}22\cdot10^{-2}$	$1{,}33\cdot10^{-2}$	$3{,}61\cdot10^{-1}$	$1{,}91\cdot10^{-1}$
Human toxicity	kg 1,4-DB equiv		9,64	1,52	9,32	1,36	$9{,}43\cdot10^{-1}$	1,61·10	1,01·10
Ionising radiation	kg U235 equiv		5,56		4,27	$5{,}74\cdot10^{-1}$	1,80·10		8,94
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv		$2{,}00\cdot10^{-1}$	$1{,}98\cdot10^{-3}$	$2{,}40\cdot10^{-1}$	$1{,}78\cdot10^{-2}$	$1{,}06\cdot10^{-2}$	$2{,}45\cdot10^{-1}$	$2{,}11\cdot10^{-1}$
Marine eutrophication	kg N equiv		$5{,}43\cdot10^{-2}$	$1{,}87\cdot10^{-1}$	$4{,}48\cdot10^{-1}$	$5{,}27\cdot10^{-2}$	$1{,}69\cdot10^{-3}$	1,43	$8{,}54\cdot10^{-2}$
Metal depletion	kg Fe equiv	$3{,}02\cdot10^{2}$	1,08		1,04·10	$1{,}13\cdot10^{-1}$	$8{,}31\cdot10^{-2}$		1,38
Particulate matter formation	kg PM10 equiv		$1{,}21\cdot10^{-1}$	$1{,}39\cdot10^{-1}$	$4{,}10\cdot10^{-1}$	$5{,}00\cdot10^{-2}$	$2{,}96\cdot10^{-3}$	1,95	$8{,}25\cdot10^{-2}$
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC equiv		$2{,}64\cdot10^{-1}$	$9{,}01\cdot10^{-1}$	1,36	$1{,}88\cdot10^{-1}$	$4{,}70\cdot10^{-3}$	7,38	$3{,}21\cdot10^{-1}$
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv		$1{,}88\cdot10^{-2}$	$1{,}98\cdot10^{-2}$	$1{,}01\cdot10^{-2}$	$4{,}64\cdot10^{-3}$	$3{,}28\cdot10^{-4}$	$4{,}29\cdot10^{-1}$	$6{,}08\cdot10^{-3}$
Water depletion	m^3	1,46	5,54·10		7,48·10	5,94	6,99·10	1,07	8,86·10

*Les valeurs présentées ici sont valables pour le scénario de transport sur 50 km ; les valeurs pour l'étape transport sur 100 et 150 km sont données dans le tableau suivant.

Tableau 35: Impacts de l'étape transport des plaquettes sur 100 et 150 km

Impact	Unité	Transport 100 km	Transport 150 km
Climate change	kg CO_2 equiv	$4{,}23 \cdot 10$	$6{,}34 \cdot 10$
Terrestrial acidification	kg SO_2 equiv	$1{,}50 \cdot 10^{-1}$	$2{,}24 \cdot 10^{-1}$
Freshwater eutrophication	kg P equiv	$1{,}01 \cdot 10^{-3}$	$1{,}51 \cdot 10^{-3}$
Ozone depletion	kg CFC-11 equiv	$6{,}31 \cdot 10^{-6}$	$9{,}47 \cdot 10^{-6}$
Fossil depletion	kg oil equiv	$1{,}45 \cdot 10$	$2{,}18 \cdot 10$
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv	$3{,}19 \cdot 10^{-2}$	$4{,}79 \cdot 10^{-2}$
Human toxicity	kg 1,4-DB equiv	1,96	2,94
Ionising radiation	kg U235 equiv	$8{,}27 \cdot 10^{-1}$	1,24
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv	$2{,}56 \cdot 10^{-2}$	$3{,}84 \cdot 10^{-2}$
Marine eutrophication	kg N equiv	$7{,}60 \cdot 10^{-2}$	$1{,}14 \cdot 10^{-1}$
Metal depletion	kg Fe equiv	$1{,}62 \cdot 10^{-1}$	$2{,}44 \cdot 10^{-1}$
Particulate matter formation	kg PM10 equiv	$7{,}20 \cdot 10^{-2}$	$1{,}08 \cdot 10^{-1}$
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC equiv	$2{,}71 \cdot 10^{-1}$	$4{,}07 \cdot 10^{-1}$
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv	$6{,}68 \cdot 10^{-3}$	$1{,}00 \cdot 10^{-2}$
Water depletion	m^3	8,56	$1{,}28 \cdot 10$

Tableau 36: Résultats ACV détaillés - scénarios fossiles et électrique

Scénario		Electric heating (S1)	Individual gas boiler (S6)		Oil boiler (S7)		Collective gas boiler (S9)	
Impact	Unité	French electricity mix	French electricity mix (combustion)	Heat from natural gas (condensing boiler)	French electricity mix (combustion)	Heat from light fuel oil	French electricity mix (combustion)	Heat from natural gas (industrial setting)
Climate change	kg CO_2 equiv	$8{,}05 \cdot 10^{2}$	2,73	$2{,}22 \cdot 10^{3}$	2,73	$3{,}61 \cdot 10^{3}$	1,79·10	$2{,}96 \cdot 10^{3}$
Terrestrial acidification	kg SO_2 equiv	4,19	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	1,71	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	7,08	$9{,}32 \cdot 10^{-2}$	2,51
Freshwater eutrophication	kg P equiv	$3{,}71 \cdot 10^{-1}$	$1{,}26 \cdot 10^{-3}$	$7{,}38 \cdot 10^{-2}$	$1{,}26 \cdot 10^{-3}$	$1{,}47 \cdot 10^{-1}$	$8{,}25 \cdot 10^{-3}$	$1{,}23 \cdot 10^{-1}$
Ozone depletion	kg CFC-11 equiv	$4{,}19 \cdot 10^{-5}$	$1{,}42 \cdot 10^{-7}$	$3{,}42 \cdot 10^{-4}$	$1{,}42 \cdot 10^{-7}$	$5{,}26 \cdot 10^{-4}$	$9{,}32 \cdot 10^{-7}$	$4{,}18 \cdot 10^{-4}$
Fossil depletion	kg oil equiv	$2{,}21 \cdot 10^{2}$	$7{,}50 \cdot 10^{-1}$	$8{,}81 \cdot 10^{2}$	$7{,}50 \cdot 10^{-1}$	$1{,}23 \cdot 10^{3}$	4,91	$1{,}22 \cdot 10^{3}$
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv	7,29	$2{,}48 \cdot 10^{-1}$	1,34	$2{,}48 \cdot 10^{-1}$	4,16	$1{,}62 \cdot 10^{-1}$	1,90
Human toxicity	kg 1,4-DB equiv	$5{,}17 \cdot 10^{2}$	1,75	7,46·10	1,75	$2{,}22 \cdot 10^{2}$	1,15·10	$1{,}01 \cdot 10^{2}$
Ionising radiation	kg U235 equiv	$9{,}86 \cdot 10^{3}$	3,35·10	4,77·10	3,35·10	$1{,}86 \cdot 10^{2}$	$2{,}19 \cdot 10^{2}$	8,92·10
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv	5,80	$1{,}97 \cdot 10^{-2}$	1,57	$1{,}97 \cdot 10^{-2}$	3,33	$1{,}29 \cdot 10^{-1}$	2,11
Marine eutrophication	kg N equiv	$9{,}28 \cdot 10^{-1}$	$3{,}15 \cdot 10^{-3}$	$4{,}64 \cdot 10^{-1}$	$3{,}15 \cdot 10^{-3}$	1,34	$2{,}06 \cdot 10^{-2}$	$8{,}53 \cdot 10^{-1}$
Metal depletion	kg Fe equiv	4,55·10	$1{,}54 \cdot 10^{-1}$	2,27·10	$1{,}54 \cdot 10^{-1}$	7,07·10	1,01	1,38·10
Particulate matter formation	kg PM10 equiv	1,62	$5{,}51 \cdot 10^{-3}$	$5{,}43 \cdot 10^{-1}$	$5{,}51 \cdot 10^{-3}$	2,09	$3{,}61 \cdot 10^{-2}$	$8{,}23 \cdot 10^{-1}$
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC equiv	2,57	$8{,}73 \cdot 10^{-3}$	2,18	$8{,}73 \cdot 10^{-3}$	5,81	$5{,}72 \cdot 10^{-2}$	3,20
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB equiv	$1{,}80 \cdot 10^{-1}$	$6{,}10 \cdot 10^{-3}$	$4{,}34 \cdot 10^{-2}$	$6{,}10 \cdot 10^{-3}$	$2{,}47 \cdot 10^{-1}$	$3{,}99 \cdot 10^{-3}$	$6{,}06 \cdot 10^{-2}$
Water depletion	m^3	$3{,}83 \cdot 10^{4}$	$1{,}30 \cdot 10^{2}$	$5{,}42 \cdot 10^{2}$	$1{,}30 \cdot 10^{2}$	$2{,}19 \cdot 10^{3}$	$8{,}51 \cdot 10^{2}$	$8{,}84 \cdot 10^{2}$

Annexe VI. Revue de littérature sur les coûts de production de la biomasse-énergie – données détaillées

Tableau 37: Revue de littérature sur les coûts de production de la biomasse-énergie

Référence bibliographique	Provenance géographique	Forme de carburant bois	Source du carburant	Rendement moyen (GJ/ha/year)	Coût de la ressource en $2005 par GJ		
					Coût total	Dont carburant	Dont engrais
[Leinonen, 2007]	Afrique (Namibie)	TCR broyé	Buissons envahissants	100,80	1,37		
					1,19		
[Chandioux & Ricodeau, 2013]	Europe (France)	Bois rond	Plantations de pin d'Alep	32,40	4,01		
					3,60		
[François, 2006]	Europe (France)	Plaquettes forestières	Plantations de chêne et de hêtre	232,50	3,12		
				246,32	3,12		
				112,67	2,77		
				169,50	3,12		
[O'Brien & Mak, 2004]	Canada	Bois rond	Forêts de résineux	1 404,86	1,05		
			Forêts de feuillus	1 590,41	1,27		
[CRPF Bretagne, 2009]	Europe (France)	Plaquettes forestières	Plantations	155,03	5,41		
[Rotheneder, 2012]	Europe (Autriche)	Plaquettes forestières	Forêts		5,57		
					3,10		
[Laitila et al,, 2010]	Europe (Finlande)	Plaquettes forestières	Forêts		9,52	1,78	
[Hayes et al,, 2011]	Etats-Unis	Bois rond	Forêts		2,16	0,68	
		Bois rond	Forêts		3,79	1,09	
[Rialland & Planchet, 2011]	Europe (France)	Plaquettes forestières	Plantations		4,72		
[Anttila et al,, 2011]	Europe (Espagne)	Plaquettes forestières	Forêts		3,62		
[Monti et al,, 2006]	Europe (Italie)	Culture énergétique	Panic raide (switchgrass)	577,43	0,53	0,08	0,04
[Fibois Alsace, 2007]	Europe (France)	Plaquettes forestières	Forêts		5,08		
[Asikainen & Laitila, 2006]	Europe (Finlande)	Plaquettes forestières	Forêts		11,40		
[Bauen et al,, 2010]	Europe (Royaume-Uni)	TCR	Saule / peuplier	180,00	3,61		
		Culture énergétique	Miscanthus	144,00	4,89		
[de Wit et al,, 2013]	Brésil	TCR	Eucalyptus	327,60	0,85		0,07
	Europe (Italie)		Peuplier	252,00	3,50		0,24

Référence	Provenance géographique	Forme de carburant bois	Source du carburant	Rendement	Coût de la ressource en $2005 par GJ		
	Europe (Suède)		Saule	180,00	2,27		0,36
[Kent et al,, 2011]	Europe (Irlande)	Plaquettes forestières	Forêts de résineux	173,42	2,53	0,16	
				160,08	3,05	0,18	
				160,08	4,85	0,27	
				180,09	3,06	0,19	
				193,43	2,75	0,15	
				163,42	6,65	0,41	
				167,42	4,94	0,28	
		Bois rond		166,75	10,82	1,08	
		Plaquettes forestières	Forêts de feuillus	122,67	7,28	0,43	
				122,67	5,15	0,31	
		Bois rond		94,60	4,95	0,29	
				123,20	5,39	0,45	
				129,80	5,90	0,34	
				123,20	8,84	0,52	
		Bois traditionnel		129,80	10,60	0,58	
				129,80	9,76	0,56	
[Dornburg et al,, 2005]	Europe (Pays-Bas)	TCR	Peuplier	162,00	4,88		0,17
	Europe (Pologne)			162,00	6,20		0,45
[van den Broek et al,, 1997]	Europe (Irlande)	TCR	Saule	162,00	1,74		0,39
				162,00	2,16		0,78
				162,00	2,31		0,78
				162,00	3,37		0,78
				162,00	3,41		0,78
				162,00	3,55		0,78
[Pecenka & Hoffmann, 2015]	Europe (Allemagne)	TCR broyé	Peuplier	180,00	2,78		
				180,00	3,85		
				180,00	2,41		
				180,00	3,19		
				180,00	2,63		
				180,00	2,25		
				180,00	2,66		
				180,00	2,29		

Référence	Provenance géographique	Forme de carburant bois	Source du carburant	Rendement	Coût de la ressource en $2005 par GJ		
				180,00	2,29		
				180,00	1,68		
				180,00	5,60		
				180,00	4,01		
				180,00	5,60		
[Lewandowski et al,, 2006]	Europe (République Tchèque)	TCR	Saule / peuplier	145,80	2,31		
[van den Broek et al,, 2002]	Europe (Irlande)	TCR	Saule	162,00	4,05		
	Europe (Pays-Bas)		Chanvre	180,00	5,49		
	Europe (Pays-Bas)		Saule	180,00	4,65		
[van den Broek et al,, 2000]	Amérique Latine hors Brésil (Nicaragua)	TCR	Eucalyptus	246,38	0,95		
[van den Broek et al,, 2001]	Europe (Irlande)	TCR	Saule	9,00	3,46		
		TCR	Peuplier	8,20	2,23		
		Bois rond	Plantations de résineux	7,00	3,09		
[Walsh, 1998]	Etats-Unis	Culture énergétique	Panic raide (switchgrass)	215,04	1,90	0,01	0,60
		TCR	Peuplier	201,60	3,59	0,02	0,23
			Saule	201,60	3,04	0,00	0,23
[Thorsell et al,, 2004]	Etats-Unis	Culture énergétique	Panic raide (switchgrass) / prairie naturelle / Paille de blé	41,80	0,76		
				85,50	0,63		
				127,30	0,64		
				171,00	0,63		
				212,80	0,61		
				254,60	0,62		
[Smeets et al,, 2009]	Europe (Pologne)	Culture énergétique	Miscanthus	347,70	2,82	0,23	0,12
				347,70	1,72	0,23	0,12
	Europe (Hongrie)			366,00	2,82	0,35	0,23
				366,00	2,23	0,23	0,23
	Europe (Royaume-Uni)			274,50	4,23	0,47	0,35
				274,50	3,17	0,29	0,35
	Europe (Italie)			457,50	2,94	0,18	0,29
				457,50	2,47	0,12	0,29
	Europe (Lithuanie)			311,10	2,82	0,18	0,18
				311,10	2,47	0,12	0,18

Référence	Provenance géographique	Forme de carburant bois	Source du carburant	Rendement	Coût de la ressource en $2005 par GJ		
	Europe (Pologne)		Panic raide (switchgrass)	274,50	1,88	0,23	0,12
				274,50	1,29	0,23	0,12
	Europe (Hongrie)			292,80	2,23	0,35	0,23
				292,80	1,53	0,23	0,23
	Europe (Royaume-Uni)			219,60	3,52	0,47	0,35
				219,60	2,58	0,35	0,35
	Europe (Italie)			366,00	2,00	0,23	0,23
				366,00	1,64	0,18	0,23
	Europe (Lithuanie)			237,90	2,11	0,23	0,18
				237,90	1,53	0,23	0,18
[Spinelli et al,, 2002]	Etats-Unis	TCR broyé	Eucalyptus	539,32	2,07		
				539,32	2,46		
[Hallam et al,, 2001b]	Etats-Unis	Culture énergétique	Panic raide (switchgrass)	159,41	1,61	0,01	0,60
				155,79	1,70	0,01	0,61
			Barbon de Gérard (big bluestem)	131,90	2,21	0,01	0,72
				108,67	2,51	0,02	0,87
			Alpiste roseau (reed canarygrass)	112,19	2,50	0,02	0,85
				142,00	2,07	0,01	0,67
			Luzerne	144,23	3,35	0,04	1,45
				127,12	3,80	0,05	1,65
				153,16	3,28	0,04	1,37
				132,51	3,82	0,05	1,58
[Huang et al,, 2009]	Etats-Unis	Culture énergétique	Panic raide (switchgrass)	203,61	3,35		
				203,61	3,05		
		TCR broyé	Peuplier	19,53	3,19		
		Plaquettes forestières	Forêts de trembles	20,01	3,95		
[Khanna et al,, 2008]	Etats-Unis	Culture énergétique	Panic raide (switchgrass)	147,18	4,21		1,01
			Miscanthus	608,60	2,49		0,23
[Styles et al,, 2008]	Europe (Irlande)	TCR broyé	Saule	216,00	2,92		0,57
		Culture énergétique	Miscanthus	340,00	3,03		0,61

Analyse environnementale et économique des filières bois-énergie

Le but de cette thèse est de conduire l'analyse environnementale et économique de plusieurs filières bois-énergie basée sur des technologies de combustion variées. Les bilans matière et énergie des filières s'appuient sur des modèles de croissance de la forêt, et sur des modèles de combustion basés sur les émissions de poêles et chaudières en conditions réelles. La croissance de la forêt est simulée pour le pin des Landes et le hêtre de Lorraine selon plusieurs itinéraires de gestion sylvicole. Les étapes de récolte, transformation, et transport, ainsi que les données économiques sont basées sur des données de la littérature L'analyse environnementale compare les impacts calculés selon deux méthodes : ReCiPe et CML 2001. Une analyse dynamique de l'impact « Changement Climatique » complète la discussion sur les impacts environnementaux du bois-énergie. Enfin, une perspective plus large est ouverte avec une modélisation de l'usage des terres et des coûts de production de biomasse-énergie à l'échelle globale. Les résultats de l'Analyse de Cycle de Vie montrent l'importance à la fois de la qualité de la combustion (et donc de la technologie) et des étapes de transformation et de transport de la biomasse. Par exemple, les poêles et chaudières à granulés bénéficient de très bons rendements énergétiques mais sont handicapés par l'étape de séchage de la biomasse, qui consomme des énergies fossiles. Ces équipements sont également beaucoup plus onéreux à installer que les poêles et chaudières à bûches. L'analyse dynamique montre que l'intensification des itinéraires forestiers par raccourcissement des cycles de croissance entraîne un impact supplémentaire qui n'est pas tout à fait compensé par l'augmentation de production des plantations.

Mots-clés : ACV, biomasse, bois, combustion, modélisation, économie, environnement

Environmental and economic analysis of wood-to-heat production chains

The objective of this thesis is to conduct the environmental and economic analysis of several wood-to-energy production chains based on various wood combustion technologies. The material and energy balances of the production chains are determined with modeling of forest growth and of wood combustion. The wood combustion models use the emission factors from real-scale experimental tests on stoves and boilers. Forest growth is modeled for maritime pine and beech plantations, according to several forest management schemes. The data on the harvest, transformation, and transport steps, as well as the economic data, were taken from the literature. The environmental analysis compares the impacts calculated by two methods: ReCiPe and CML 2001. A dynamic analysis of the "climate change" impact complements the discussion on the environmental impacts of energy wood. Finally, we open a broader perspective with modeling of land use and production costs of bioenergy on a global scale. The results of the Life Cycle Analysis show the importance of both combustion quality (linked to combustion technology), and the transformation and transport steps. For instance, pellet stoves and boilers have excellent efficiencies, but suffer from the consumption of fossil fuels to dry the biomass. These technologies are also much more expensive to buy than log stoves or boilers. The dynamic analysis shows that the intensification of wood production via the shortening of growth cycles leads to higher impacts that are not completely offset by the higher production rate.

Keywords: LCA, biomass, wood, combustion, modelling, economy, environment