RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

ANALYSE DU CYCLE DE VIE DU BOIS ENERGIE COLLECTIF ET INDUSTRIEL

RAPPORT FINAL

Octobre 2021

EXPERTISES

RDC environment
BIOMASSE NORMANDIE
FCBA INSTITUT TECHNOLOGIQUE

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'ensemble des membres du Comité Technique de l'étude pour leur contribution, de même que les 3 membres de la revue critique :

- Annie Levasseur (présidente) (École de technologie supérieure, Université du Québec) ;
- Kati Koponen (VTT Technical Research Centre of Finland) ;
- Hugues Imbeault-Tétreault (Groupe AGÉCO).

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME. X. Logel, J. Lhotellier, B, De Caevel, C. Alexandre, S. Cousin, E Vial, A.Thivolle-Cazat, P. Cailly, AL Dubilly, M. Buitrago, M. Durand, E. Machefaux et J. Mousset. Janvier 2022. Analyse du Cycle de Vie du bois énergie collectif et industriel – Rapport. 400 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne sur https://librairie.ademe.fr/

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

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 17MAR001240

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : RDC Environment, Biomasse Normandie, FCBA
Coordination technique - ADEME : DUBILLY Anne-Laure et BUITRAGO Miriam
Direction/Service : Service Forêt Alimentation et Bioéconomie, Direction Bioéconomie et Energies Renouvelables

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE 11

1. INTRODUCTION 11

2. OBJECTIFS DE L'ETUDE, PUBLIC CIBLE ET REVUE CRITIQUE 12

2.1. Objectifs 12

2.2. Public cible 13

2.3. Revue critique 13

3. ORGANISATION DU PRESENT RAPPORT 13

4. QUESTIONNEMENTS DE L'ETUDE 14

PARTIE 1 : ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE DIFFERENTES FILIERES BOIS ENERGIE ... 16

1. CHAMP ET OBJECTIFS DE L'EVALUATION 16

1.1. Informations préliminaires à la définition des scénarios 16

1.2. Scénarios étudiés 20

2. METHODOLOGIE D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE 26

2.1. Description de la méthodologie d'analyse du cycle de vie 26

2.2. Unité fonctionnelle 27

2.3. Frontières des systèmes étudiés 28

2.4. Enjeux environnementaux 34

2.5. Multifonctionnalité et problèmes d'affectation 38

2.6. Approche suivie : attributionnelle 39

2.7. Critères de coupure 40

2.8. Méthodologie suivie pour fiabiliser les résultats de l'évaluation environnementale 40

2.9. Précautions de lecture et d'utilisation des résultats de cette étude 41

3. DONNEES ET HYPOTHESES DES SCENARIOS EN CAS DE BASE 42

3.1. Principe de collecte des données suivi 42

3.2. Gestion sylvicole pour la production de biomasse 42

3.3. Préparation du combustible 43

3.4. Combustion du combustible en chaufferie 49

4. DONNEES ET HYPOTHESES POUR LES VARIANTES 57

4.1. Variabilité des systèmes rencontrés 57

4.2. Variabilités des choix méthodologiques 67

5. RESULTATS 71

5.1. Enjeux environnementaux pertinents pour les filières bois énergie 71

5.2. Étapes les plus contributrices pour chaque filière bois énergie 73

5.3. Influence de différents paramètres de terrain sur le bilan environnemental 86
5.4. Influence des choix méthodologiques réalisés sur le bilan environnemental 97
5.5. Analyse comparative de l'utilisation de plaquettes forestières pour alimenter différents types de chaufferie 99
5.6. Mise en perspective des filières bois énergie les unes par rapport aux autres 101
6. LIMITES ET BESOINS DE RECHERCHES COMPLEMENTAIRES 107
7. CONCLUSIONS 109
7.1. Enjeux environnementaux pertinents pour les filières bois énergie 109
7.2. Étapes les plus contributrices aux enjeux environnementaux des filières bois énergie 109
7.3. Pistes pour diminuer l'impact environnemental des filières bois énergie 111
7.4. Influence des choix méthodologiques sur le bilan environnemental 112
7.5. Différences de contribution aux différents enjeux environnementaux entre les différentes filières bois énergie 112
PARTIE 2 : EVALUATION ENVIRONNEMENTALE COMPARATIVE DE LA PRODUCTION DE CHALEUR A PARTIR DE BOIS ET DE GAZ NATUREL 114
1. CHAMP ET OBJECTIFS DE L'EVALUATION 114
2. METHODOLOGIE D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE 114
2.1. Description de la méthodologie d'analyse du cycle de vie 114
2.2. Unité fonctionnelle 114
2.3. Frontières des systèmes étudiés 114
2.4. Enjeux environnementaux 116
2.5. Multifonctionnalité et problèmes d'affectation 116
2.6. Approche attributionnelle ou conséquentielle 116
2.7. Critères de coupure 116
2.8. Méthodologie suivie pour fiabiliser les résultats de l'évaluation environnementale 116
3. DONNEES ET HYPOTHESES DU SCENARIO EN CAS DE BASE ET DES VARIANTES 117
3.1. Principe de collecte des données suivi 117
3.2. Production du gaz naturel 117
4. RESULTATS 127
4.1. Préalable – Guide de lecture des résultats 127
4.2. Enjeux environnementaux pertinents pour la filière gaz 127
4.3. Comparaison entre la filière gaz et les filières bois énergie pour la production de chaleur 128
5. CONCLUSIONS 133
PARTIE 3 : ÉVALUATION DU BILAN GES DE LA PRODUCTION DE CHALEUR A PARTIR DE PLAQUETTES FORESTIERES, ISSUES DE DIFFERENTS SCENARIOS SYLVICOLES INTEGRANT UNE RECOLTE ACCRUE DU BOIS EN FORET 134
1. CONTEXTE, OBJECTIF ET METHODE 134

2. PRESENTATION DES SCENARIOS 142
2.1. Présentation des scénarios 143
2.2. Présentation des modèles utilisés 146
3. PRESENTATION DES RESULTATS RELATIFS AUX TAILLIS 147
3.1. Mise en exploitation des taillis en maintenant le système de taillis 149
3.2. Amélioration des taillis vers des futaies 153
3.3. Transformation des taillis 155
4. PRESENTATION DES RESULTATS RELATIFS AUX MENUS BOIS, HOUPPIERS ET SOUCHES 164
4.1. Récolte de menus bois et des houppiers 164
4.2. Récolte des souches 171
4.3. Estimation de l'impact des scénarios de récolte de menus bois et des souches sur le carbone du sol 174
4.4. Interprétation des résultats 175
5. PRESENTATION DES RESULTATS RELATIFS AUX DEPRISES AGRICOLES 176
5.1. Présentation des scénarios 176
5.2. Résultats 180
5.3. Interprétation des résultats 181
5.4. Tableau de résultats 181
6. PRESENTATION DU BILAN GES TOTAL DE LA PRODUCTION DE CHALEUR A PARTIR DE PLAQUETTES FORESTIERES, ISSUES DE DIFFERENTS SCENARIOS SYLVICOLES INTEGRANT UNE RECOLTE ACCRUE DU BOIS EN FORET 182
6.1. Résumé du bilan GES biogénique 182
6.2. Bilan GES biogénique et fossile 188
7. CONCLUSIONS 192
8. LIMITES ET BESOINS DE RECHERCHE COMPLEMENTAIRES 195
8.1. La méthode ILCD appliquée dans l'étude permet des analyses pertinentes qui pourraient être complétées 196
8.2. Les données alimentant notamment les scénarios de référence ont besoin de consolidation et pourraient être étoffées de manière à tester plus de scénarios forestiers 197
8.3. Les résultats présentés doivent être contextualisés 199
PARTIE 4 : POSITIONNEMENT DE L'ETUDE PAR RAPPORT A LA DIRECTIVE 2018/2001 200
1. POSITIONNEMENT PAR RAPPORT AUX ARTICLES DE LA DIRECTIVE 200
2. POSITIONNEMENT PAR RAPPORT AUX TRAVAUX PREPARATOIRES 207
2.1. Valeurs par défaut pour la production d'électricité 207
2.2. Valeurs par défaut pour la production de plaquettes forestières provenant de rémanents d'exploitation forestière 208
2.3. Valeurs par défaut pour la production de plaquettes forestières issues de rondins 208

2.4. Valeurs par défaut pour la production de produits connexes des industries de transformation du bois 208

2.5. Valeurs par défaut pour la production de granulés de produits connexes des industries de transformation du bois 209

3. CONCLUSIONS 209

ANNEXES GENERALES 210

1. ANNEXE 1 : MEMBRES DU COTECH 210

2. ANNEXE 2 : QUESTIONNEMENTS LISTES AU DEBUT DE L'ETUDE 211

ANNEXES RELATIVES A LA PARTIE 1 213

3. ANNEXE 3 : COMPOSITION DU BOIS 213

4. ANNEXE 4 : PCI DU COMBUSTIBLE 213

5. ANNEXE 5 : MODELISATION DU TRANSPORT 214

6. ANNEXE 6 : COMPOSITION DES CENDRES SOUS FOYER ET SOUS MULTI-CYCLONE 216

7. ANNEXE 7 : MIX ELECTRIQUE 216

ANNEXES RELATIVES AUX PARTIES 1 & 2 217

8. ANNEXE 8 : DESCRIPTION DETAILLEE DE LA METHODOLOGIE SUIVIE POUR L'EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX 217

8.1. Classification 217

8.2. Caractérisation 217

8.3. Normalisation 218

8.4. Pondération 218

9. ANNEXE 9 : DESCRIPTION DES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX COUVERTS PAR LES INDICATEURS DE CATEGORIE D'IMPACT 220

10. ANNEXE 10 : METHODOLOGIE SUIVIE POUR FIABILISER LES RESULTATS DE L'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE 220

10.1. Principes suivis 220

10.2. Evaluation de la qualité des jeux de données d'inventaire 227

10.3. Prise en compte de l'incertitude dans l'évaluation environnementale 229

11. ANNEXE 11 : RESULTATS EN VALEUR ABSOLUE 234

11.1. Résultats relatifs à la partie 1 234

11.2. Résultats relatifs à la partie 2 - Résultats normalisés et pondérés 256

ANNEXES RELATIVES A LA PARTIE 3 257

12. ANNEXE 12 : BIBLIOGRAPHIE 257

13. ANNEXE 13 : HYPOTHESES CONSIDEREES POUR LES MODELES UTILISES 259

13.1. Modélisation des stocks de biomasse vivante en forêt 259

13.2. Modélisation des stocks de matière organique morte 261

13.3. Modélisation des stocks dans les produits 262

14. ANNEXE 14 : DESCRIPTION DETAILLEE DES SCENARIOS 265

14.1. Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1 265

14.2. Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2 269

14.3. Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3 273

14.4. Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio 277

14.5. Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1 281

14.6. Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2 285

14.7. Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3 289

14.8. Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4 292

14.9. Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5 297

14.10. Sc_FutRes_Exploit_MB_1 301

14.11. Sc_FutRes_Exploit_MB_2 305

14.12. Sc_FutRes_Exploit_MB_3 309

14.13. Sc_FutRes_Exploit_MB_4 313

14.14. Sc_FutRes_Exploit_Houppier 318

14.15. Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1 323

14.16. Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2 327

14.17. Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3 331

14.18. Sc_FutRes_Exploit_Souche_1 335

14.19. Sc_FutRes_Exploit_Souche_2 340

14.20. Sc_FutRes_Exploit_Souche_3 345

14.21. Sc_Déprise_TCR_Label 350

14.22. Sc_Déprise_TCR_Bouleau 355

14.23. Sc_Déprise_FutRes_Label 360

14.24. Sc_Déprise_FutFeuil_Label 365

15. ANNEXE 15 : RESULTATS 369

16. ANNEXE 16 : NOTE SUR L'IMPACT SUR LE CARBONE DU SOL 371

16.1. Introduction 371

16.2. Catalogues des connaissances par étude 372

16.3. Discussion 380

17. ANNEXE 17 : LISTE DES SCENARIOS 383

18. ANNEXE 18 : REPRESENTATIVITE DES SCENARIOS 385

19. ANNEXE 19 : DETAIL DES CALCULS 388

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES 391

SIGLES ET ACRONYMES 402

RÉSUMÉ

Le bois est en France une ressource renouvelable qui s'inscrit directement dans les principes de l'économie circulaire soutenue dans les politiques publiques. Il s'agit d'une alternative importante permettant de réduire la dépendance du pays aux ressources fossiles non renouvelables, et de soutenir une économie locale.

S'inscrivant dans un contexte de soutien et de fort développement du bois énergie collectif et industriel, cette étude a souhaité évaluer le bilan environnemental des principales filières bois énergie collectif et industriel, dans une perspective d'écoconception et réaliser une analyse comparative par rapport à la filière de production d'énergie à partir de gaz naturel.

Elle a consisté dans un premier temps à actualiser les connaissances, compte tenu de l'évolution des technologies des chaufferies et de l'évolution continue de la méthodologie d'évaluation environnementale. Pour ce faire, elle s'est appuyée sur des données et des méthodologies validées par la communauté scientifique, et a été conduite en concertation avec des représentants de la filière, pour assurer sa cohérence avec les réalités de celle-ci.

L'analyse de cycle de vie réalisée a permis de confirmer des pistes d'amélioration pour limiter les impacts associés aux émissions de polluants atmosphériques des chaufferies bois. En effet, le respect des valeurs limites d'émissions de particules et de NOx fixées par la directive 2015/2193 dite « Medium Combustion Plant » entraîne une amélioration des impacts des installations (1 à 50 MW) de production de chaleur à partir de biomasse pour les enjeux de qualité de l'air. Les bonnes performances relatives aux émissions de polluants atmosphériques de ces installations mettent en avant l'intérêt de technologies qui y sont mises en œuvre. L'étude permet également de confirmer la nécessité de poursuivre les efforts d'écoconception pour les installations de plus petites puissances (< 1 MW).

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) de la filière bois énergie collectif et industriel, en considérant une neutralité carbone des émissions biogéniques de combustion du bois, sont liées notamment à la consommation d'énergie tout au long du cycle de vie (sylviculture, transport, préparation du combustible, consommation chaudière et gestion de cendres). Les émissions de GES ainsi calculées sont généralement plus faibles que celles de la filière de production d'énergie à partir de gaz naturel. Pour maintenir ce plus faible niveau d'émissions, il est recommandé de maintenir de faibles distances d'approvisionnement des combustibles.

L'étude comporte également un volet exploratoire permettant d'approfondir l'effet d'une augmentation de la récolte de bois pour une production de plaquettes forestières sur les dynamiques de stockage de carbone forestier. La gestion sylvicole a une influence significative sur le bilan GES de la production d'énergie issue de ce combustible. Le maintien des pratiques de gestion sylvicole durables favorisant le stockage de carbone dans les forêts et les produits bois et d'une façon plus générale préservant la biodiversité et la qualité des sols restent des enjeux importants. Ceux-ci sont encadrés par la réglementation forestière et accompagnés par un ensemble d'outils promouvant des bonnes pratiques, qui continuent à être renforcés.

L'intégration de ces enjeux dans l'évaluation environnementale de la filière bois énergie reste un sujet à approfondir et est aujourd'hui traité par des projets de recherche.

ABSTRACT

Wood in France is a renewable resource, which is set within circular economy principles supported by public policies. It constitutes an important alternative, enabling a reduction in the country's reliance on non-renewable fossil fuels and supporting local economies.

In a context of support towards and development of fuelwood for collective and industrial applications, this study seeks to evaluate, in an eco-design approach, the environmental impact of the main collective and industrial fuelwood sectors, and to perform a comparative analysis with the natural gas energy production sector.

Considering the evolution of boiler technologies and that of environmental evaluation methodologies, the study first aimed to update knowledge. To do so, it drew on methods and data that are validated by the scientific community. To ensure its coherence with the realities of the sector, it was carried out consultatively with industry representatives.

The life cycle analysis performed confirms improvement opportunities to limit the impact of wood energy plants' atmospheric emissions. Abiding by the emission limit values for particulate matter and NOx, as defined in the 2015/2193 "Medium Combustion Plant" Directive, leads to an improvement in the biomass heating plant's (1-50 MW) impact regarding air quality. These plants' good performance regarding atmospheric pollutants highlights the benefits of the technologies in use in these facilities. The study also confirms the need to continue eco-design efforts in less powerful combustion plants (< 1 MW).

When biogenic carbon emissions resulting from the combustion of wood are considered neutral, greenhouse gas (GHG) emissions in the collective and industrial fuelwood sectors are in particular due to energy consumption throughout the life cycle (forestry, transport, fuel preparation, plant power supply and ash management). Thus calculated, the GHG emissions are usually lower than those of the natural gas energy production sector. To maintain low emission levels, maintaining short fuel supply distances is recommended.

The study also includes an exploratory section, to examine in greater depth the effect on forest carbon stock dynamics of increased wood harvesting for wood chip production. Forestry practices significantly influences the GHG balance of energy production using this fuel source. An important challenge is maintaining sustainable forestry practices, which enhance carbon storage in forests and wood products, and preserve biodiversity and the quality of soils. Forestry regulation and tools encouraging good practice regarding these issues continue to be strengthened.

Integrating these challenges in the environmental evaluation of the fuelwood sector requires further research, and is the topic of ongoing research projects.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Introduction

La biomasse énergie est au cœur des stratégies nationales de la transition énergétique.

L'UE s'est fixée l'objectif d'atteindre en 2030 au moins 33 % d'énergie renouvelable consommée (EnR)[1]. La France contribue à cet objectif à travers la mise en place de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)[2]. L'un des objectifs de la PPE est notamment de multiplier par deux la quantité de chaleur et de froid d'origine renouvelable (à partir de bois ou d'autres sources) produite par rapport à 2012.

État des lieux du bois énergie industriel et collectif.

En intégrant le bois énergie résidentiel et le bois énergie collectif et industriel, la filière bois énergie est aujourd'hui la première EnR en France. En 2019, elle représente 36 % de la production primaire nationale d'énergies renouvelables, pratiquement exclusivement sous forme de chaleur ; seulement 8 % de sa production est électrique. C'est ainsi environ 78 % de la chaleur renouvelable dont 54 % bois domestique et 17 % dans le secteur collectif et industriel. Cette étude traite le bois énergie collectif et industriel.[3]

Dans le secteur collectif et industriel, les combustibles utilisés sont variés. L'estimation de la répartition des combustibles biomasse dans les installations financées par le Fonds Chaleur et les installations de cogénération de plus de 1200 MWh/an en 2018[4] donne approximativement la répartition suivante : environ 45 % de plaquettes forestières ; 9,5 % de plaquettes bocagères ; 17 % de connexes de l'industrie de la transformation du bois ; 17 % de sous-produits industriels et agricoles ; 7% de bois en fin de vie SSD (Sortie du statut de déchet) ; 4 % de bois déchet « adjuvanté » ; 0,5 % de granulés du bois et autres.

État des lieux de la forêt et de la commercialisation du bois récolté en forêt en France métropolitaine.

La forêt couvre aujourd'hui 16,9 millions d'hectares (Mha) en France métropolitaine, soit 31 % du territoire. Au cours du XXème siècle, la surface forestière s'est accrue de 6 Mha. Cette dynamique d'expansion se poursuit aujourd'hui avec une augmentation d'environ 60 000 ha par an de surface de forêt depuis 2010.

La récolte totale du bois forestier pour l'ensemble des usages représente environ 60 % de l'accroissement naturel net de la forêt sur la période 2009-2017[5]. En 2018, la récolte de bois commercialisé en France métropolitaine s'établit à 38,9 millions de m³, dont 20 millions de m³ de bois d'œuvre, 10,3 millions de m³ de bois d'industrie et 8,6 millions de m³ de bois énergie utilisé notamment dans le secteur industriel ou collectif[6]. Pour le secteur bois énergie domestique, il faut ajouter la récolte de bois autoconsommé (intégrant le bois forestier et hors forêt) estimé à 16,9 millions de m³. La part de bois de chauffage en provenance de la forêt est estimée à 64 %[7].

La récolte du bois énergie en forêt correspond à des coupes de bois de faible diamètre ou qualité. Cela peut être issu, pour les peuplements de futaies[8] : de travaux d'éclaircies, de coupes sanitaires, de la récolte de cimes dans les coupes finales destinées à la production de bois d'œuvre, de la récolte d'arbres de trop faible qualité pour une utilisation en bois d'œuvre, de coupes de relevé de couvert et d'ouvertures de cloisonnements. Pour les peuplements de taillis, il s'agit de coupes de balivage ou de coupes totales de peuplements matures ou dépérissant suivi d'un renouvellement des peuplements après les coupes. Enfin, cela peut correspondre, pour des peuplements hétérogènes sans potentiel de production de bois de qualité issu d'accrus naturels, à des coupes totales des peuplements suivi d'un renouvellement. La commercialisation de la récolte de bois énergie en forêt croît fortement (+200 % depuis 2008). Cette croissance est à destination principalement des collectivités et des industries, mais aussi de la filière chauffage au bois domestique, qui se professionnalise. Cette hausse

[1] Directive (UE) 2018/2001 du parlement européen et du conseil du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, disponible à https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN

[2] https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/programmations-pluriannuelles-lenergie-ppe

[3] Chiffres clés des énergies renouvelables - Édition 2020, publiés par le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, disponible à https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-des-energies-renouvelables-edition-2020?rubrique=18.

[4] Étude ADEME, Compilation des consommations et prélèvements de biomasse par région et par nature de combustible – 2016, disponible à https://www.ademe.fr/compilation-consommations-prelevements-biomasse-region-nature-combustible

[5] Selon l'Inventaire forestier national de l'IGN publié en 2019 https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique250

[6] Agreste Primeur, numéro 360, Décembre 2019

[7] Étude ADEME, Étude sur le chauffage domestique au bois - 2018, disponible à https://www.ademe.fr/etude-chauffage-domestique-bois

[8] Un lexique des termes de gestion forestière est disponible dans les annexes du rapport

s'explique notamment par le fait que la biomasse énergie est au cœur des stratégies européennes et nationales de transition énergétique. En revanche l'autoconsommation de bois bûches dans le secteur domestique s'est fortement réduite. Ainsi, la quantité de bois récoltée en forêt utilisé pour l'énergie reste au global relativement constante.

L'ADEME poursuit ses travaux afin de favoriser une production de chaleur renouvelable à haute valeur environnementale.

Dans cette objectif, l'ADEME a réalisé en 2005 une première évaluation environnementale du chauffage au bois dans les secteurs domestique, collectif et industriel[9]. En 2015, l'ADEME a réalisé une nouvelle étude dressant un état de l'art des principales difficultés méthodologiques rencontrées lors de la réalisation d'évaluations environnementales dans le domaine du chauffage au bois et mettant en pratique les différentes méthodologies existantes[10]. Elle a ainsi permis d'établir des recommandations sur les aspects associés à la comptabilisation des émissions biogéniques. Elle a également permis d'identifier les besoins de travaux de recherche additionnels. Cette nouvelle étude s'inscrit dans cette trajectoire permettant de proposer de nouvelles données et d'explorer des évolutions méthodologiques.

2. Objectifs de l'étude, public cible et revue critique

2.1. Objectifs

Le lot 1 a pour objectif d'évaluer le bilan environnemental des principales filières bois énergie collectif et industriel afin :

- d'identifier, pour chaque filière, les étapes du cycle de vie les plus contributrices dans une perspective d'écoconception ;
- de préciser les conditions de production de chaleur pour le collectif ou l'industrie permettant d'optimiser l'intérêt environnemental, par rapport à la production en chaufferie alimentée par du gaz.

Ce premier lot évalue ces différentes filières selon la méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV) en utilisant le principe de neutralité carbone des émissions biogéniques[11] dans l'indicateur changement climatique.

Le lot 1 a été réalisé par RDC Environment avec le support technique de Biomasse Normandie.

Le lot 2 a pour objectif d'évaluer les bilans des gaz à effet de serre (GES) de la production de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles intégrant une récolte accrue du bois. Cette deuxième partie constitue une première approche méthodologique permettant de mieux comprendre l'effet de l'augmentation de la récolte de bois sur les variations des stocks et puits de carbone forestiers (dans les forêts et les produits bois) liées au changements des pratiques de gestion forestière ou des changements d'usage des sols.

Elle est à considérer comme « exploratoire », permettant d'approfondir les limites de l'hypothèse de la neutralité carbone des émissions biogéniques et ainsi proposer des perspectives d'évolution. Il s'agit de dérouler la méthode sur quelques scénarios types de manière à avoir quelques premiers ordres de grandeur, et à analyser la faisabilité et les limites de la méthode. Les ordres de grandeur du bilan GES ainsi calculés, auxquels on ajoute les émissions fossiles estimées dans le lot 1, sont ensuite comparés, toujours dans une approche exploratoire, à ceux de la production de chaleur à partir de gaz.

Les résultats sont valables pour l'énergie produite dans ces scénarios intégrant une modification des pratiques de récolte de bois. Ils sont spécifiques aux scénarios testés dans le cadre de cette étude et ne sont pas généralisables à tous les MWh produits en France à partir de plaquettes forestières. Cette partie de l'étude ne s'applique pas non plus au bois énergie provenant des produits connexes, du bois en fin de vie ou déchet bois.

La partie concernant le carbone biogénique a été réalisée par FCBA. L'intégration des résultats concernant le carbone fossile issue du lot 1 dans le lot 2 a été réalisée par RDC Environment.

[9] https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/34702_acv_bois_dom.pdf
[10] https://www.ademe.fr/etude-preliminaire-a-realisation-bilans-environnementaux-chauffage-bois
[11] L'hypothèse postule un équilibre global entre les émissions de CO_2 engendrées par la combustion du bois d'une part, et les quantités de CO_2 absorbées lors de la croissance des arbres correspondant à ce bois consommé d'autre part, ce qui se traduit par une stabilité des stocks de carbone forestier.

L'ensemble de l'étude s'est appuyé sur un comité technique composé de : l'ADEME ; du ministère de la Transition Écologique et Solidaire ; du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation ; des représentants des organismes nationaux des filières bois énergie ; des experts indépendants spécialistes des questions de prise en compte du carbone biogénique, de la filière bois énergie et en ACV. La liste des membres est fournie en Annexe 1.

2.2. Public cible

Cette étude est commanditée par l'ADEME. Elle s'adresse, en premier lieu, aux décideurs publics français et aux professionnels de la filière bois énergie. Elle a cependant également vocation à informer un public plus large comme les médias et la société civile.

Par conséquent, les travaux réalisés dans le cadre de cette étude serviront à :

- faire avancer les connaissances sur l'impact environnemental de l'énergie issue du bois, en intégrant les aspects associés au carbone biogénique ;
- affiner les exigences environnementales des projets soutenus par l'ADEME dans le cadre du Fonds Chaleur ;
- analyser le positionnement de l'étude par rapport à la Directive 2018/2001.

La publication de ce rapport constitue une affirmation comparative destinée à être divulguée au public.

2.3. Revue critique

La présente étude (lot 1 et lot 2) a fait l'objet d'une revue critique externe réalisée par un comité de revue, conformément à l'exigence de la norme ISO 14040.

Le comité de revue a été constitué pour réunir des compétences scientifiques internationales sur les questions des impacts environnementaux (dont climatiques) du bois énergie. Il vient apporter un regard scientifique indépendant et une caution à la méthodologie utilisée. Le comité de revue critique est complémentaire au comité technique qui apporte des éléments d'appréciation précieux entre les travaux et les réalités de la filière et du terrain.

Les experts de la revue critique sont les suivants :

- Annie Levasseur (présidente) (École de technologie supérieure, Université du Québec) ;
- Kati Koponen (VTT Technical Research Centre of Finland) ;
- Hugues Imbeault-Tétreault (Groupe AGÉCO).

La revue critique consiste à examiner les travaux d'ACV et à évaluer la conformité par rapport aux préconisations des normes ISO 14 040 :2006 et ISO 14 044 :2006.

La revue a été organisée comme suit :

- Revue des objectifs et champ de l'étude (lot 1) en mai 2019, et revue des scénarios (lot 2) en juin 2019 ;
- Revue du rapport complet du lot 2 en janvier 2020 ;
- Revue du rapport complet du lot 1 à l'été 2020;
- Rédaction de commentaires et envoi de ceux-ci à RDC-Environment, à FCBA et à l'ADEME ;
- Suite à ces commentaires, des modifications au rapport ont été apportées par RDC Environment, FCBA et l'ADEME en vue de finaliser le rapport (octobre 2020-février 2021) ;
- Revue du rapport final (mars 2021-mai 2021).

3. Organisation du présent rapport

Afin de pouvoir répondre aux objectifs de l'étude, ce rapport est divisé en quatre parties, complétées par des annexes. Chaque partie doit permettre de répondre à certains objectifs de l'étude tels qu'énoncés dans la section 4 de la présente partie introductive.

La partie 1 de ce rapport doit permettre de conclure sur le premier objectif du lot 1 qui est d'identifier, pour chaque filière, les étapes les plus contributrices dans une perspective d'écoconception.

Elle permet également de répondre au second objectif du lot 1 à savoir comparer deux types d'usage des chaufferies (réseau de chaleur et processus industriel) avec une unité de cogénération.

Afin de répondre à ces objectifs, les composantes suivantes relatives à la gestion sylvicole sont incluses :

- les captations/émissions de CO_2 biogéniques selon le contenu carbone dans le combustible ;
- la contribution aux autres enjeux environnementaux de la gestion sylvicole (ex : émissions de particules, acidification d'air, etc.) (hors biodiversité, qualité des sols et cycle de l'eau en forêt[12]).

Les composantes exclues pour cette première partie sont :

- les captations/émissions de carbone d'origine biogénique liées aux changements d'usage des sols ;
- les captations/émissions de carbone d'origine biogénique liées aux changements de pratiques sylvicoles.

Cette partie donnera également des éléments permettant d'appréhender les différences de contribution aux différents enjeux environnementaux d'une filière bois énergie par rapport à une autre.

La partie 2 du présent rapport permet de répondre au second objectif du lot 1 à savoir déterminer si la production de chaleur pour alimenter un réseau de chaleur en chaufferie biomasse présente un intérêt environnemental par rapport à la production en chaufferie alimentée par du gaz et dans quelles conditions.

La partie 3 du présent rapport a pour objectif d'évaluer les bilans des gaz à effet de serre (GES) de la production de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles intégrant une récolte accrue du bois. Cette troisième partie constitue une première approche méthodologique permettant de mieux comprendre l'effet de l'augmentation de la récolte de bois sur les variations des stocks et puits de carbone forestiers (dans les forêts et les produits bois) liées au changements des pratiques de gestion forestière ou des changements d'usage des sols. Elle est à considérer comme « exploratoire », permettant d'approfondir les limites de l'hypothèse de la neutralité carbone des émissions biogéniques et ainsi proposer des perspectives d'évolution. Il s'agit de dérouler la méthode sur quelques scénarios types de manière à avoir quelques premiers ordres de grandeur, et à analyser la faisabilité et les limites de la méthode.

Les ordres de grandeur du bilan GES ainsi calculés, auxquels on ajoute les émissions fossiles estimées dans le lot 1, sont ensuite comparés, toujours dans une approche exploratoire, à ceux de la production de chaleur à partir de gaz.

La partie 4 de ce rapport positionne les données et hypothèses formulées dans le cadre de cette étude par rapport à la Directive 2018/2001 et ses travaux préparatoires.

4. Questionnements de l'étude

Les objectifs généraux de l'étude présentés au paragraphe 2.1 ont été déclinés en questionnements afin de faciliter l'appropriation des résultats de l'étude. Ces questionnements sont repris dans le Tableau 1. Dans ce tableau, il est par ailleurs fait mention de la partie du rapport dans laquelle ces questionnements trouveront une réponse.

Tableau 1 : Questionnements principaux de l'étude

Questionnements			Partie 1	Partie 2	Partie 3
	Q1	Comment les pratiques sylvicoles permettant d'augmenter la récolte de bois énergie peuvent-elles influer sur les stocks de carbone en forêt (et dans les produits matériaux) ?			x
	Q2	Quelle est la part des émissions de GES d'origine biogénique par rapport aux émissions de GES d'origine fossile sur l'ensemble des étapes du cycle de vie des filières bois énergie issu du bois forestier ?			x
	Q3*	Quelle est la contribution de la production d'énergie à partir de plaquettes forestières aux différents enjeux environnementaux ?	x		
	Q4*	Quelle est la contribution de la production d'énergie à partir de granulés (issus de connexes de scierie) aux différents enjeux environnementaux ?	x		
	Q5*	Quelle est la contribution de la production d'énergie à partir de connexes de papeterie aux différents enjeux environnementaux ?	x		

[12] La méthodologique ACV dans son état actuel de développement ne permet pas d'évaluer quantitativement ces enjeux.

	Q6*	Quelle est la contribution de la production d'énergie à partir de déchets de bois « propre » aux différents enjeux environnementaux ?	x		
	Q7*	Quelle est la contribution de la production d'énergie à partir de déchets de bois « adjuvanté » aux différents enjeux environnementaux ?	x		
	Q8*	Quelle est la contribution de la production d'énergie à partir de plaquettes forestières aux différents enjeux environnementaux en fonction du type d'installations de production de chaleur (chaufferie ou unité de cogénération) et de l'usage (climatique ou industriel) ?	x		
	Q9*	Est-ce que la production de chaleur pour alimenter un réseau de chaleur en chaufferie biomasse présente un intérêt environnemental par rapport à la production en chaufferie alimentée par du gaz et dans quelles conditions?		x	

* En considérant la neutralité carbone des émissions de combustion et dégradation du bois[13].

Légende

	Gestion sylvicole et récolte du bois	Toutes les étapes de gestion sylvicole : de la production éventuelle de plant en pépinière en passant par l'arbre planté (ou régénération naturelle) et allant jusqu'à la mise à disposition du bois en bord de route.
	Type de combustible et préparation du combustible	Toutes les étapes depuis la mise à disposition du bois en bord de route jusqu'au combustible préparé pour envoi à la chaufferie.
	Production d'énergie	Transport du combustible (approvisionnement de la chaufferie) et combustion en chaufferie et flux induits par la chaufferie (énergie produite et consommée, réactifs consommés et déchets générés).

Le lien entre les objectifs et les questionnements est repris dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2 : Liens entre objectifs et questionnements principaux de l'étude et mention de la partie du rapport dans laquelle ces questionnements trouveront une réponse

Objectifs	Questionnements	Partie 1	Partie 2	Partie 3
Comprendre comment les pratiques sylvicoles permettant d'augmenter la récolte de bois énergie peuvent influer sur les stocks de carbone en forêt (et dans les produits matériaux).	Q1			x
Évaluer les effets sur les bilans des gaz à effet de serre (GES) des changements d'usage de sols et/ou des changements des pratiques de gestion sylvicole liés à une production/récolte accrue de biomasse forestière à destination énergétique sur l'ensemble du cycle de vie des filières bois énergie.	Q2			x
Évaluer le bilan environnemental des principales filières bois énergie afin d'identifier, pour chaque filière, les étapes du cycle de vie les plus contributrices dans une perspective d'écoconception.	Q3* Q4* Q5* Q6* Q7*	x		
Comparer deux types d'usage des chaufferies, alimentation d'un réseau de chaleur et processus industriel, avec une unité de cogénération.	Q8*	x		
Déterminer si la production de chaleur pour alimenter un réseau de chaleur en chaufferie biomasse présente un intérêt environnemental par rapport la production en chaufferie alimentée par du gaz et dans quelles conditions.	Q9*		x	

* En considérant la neutralité carbone des émissions de combustion et dégradation du bois[14].

Les éléments pris en compte dans les différentes parties du présent rapport pour les étapes du cycle de vie des filières bois énergie sont synthétisés dans le tableau suivant.

Tableau 3 : Intégration des deux lots - Périmètre de l'analyse du cycle de vie des filières bois énergie dans les différentes parties du présent rapport

Origine des données	Périmètre de l'analyse du cycle de vie	Présent rapport			
		Partie 1	*Partie 2*	*Partie 3*	*Partie 4*

[13] L'hypothèse d'un équilibre global entre les émissions de CO_2 engendrées par la combustion du bois et les quantités de CO_2 absorbées lors de la croissance des arbres correspondant à ce bois consommé, qui se traduit par une stabilité des stocks de carbone forestier.
[14] L'hypothèse d'un équilibre global entre les émissions de CO_2 engendrées par la combustion du bois et les quantités de CO_2 absorbées lors de la croissance des arbres correspondant à ce bois consommé, qui se traduit par une stabilité des stocks de carbone forestier.

Lot 1	Gestion sylvicole	Captations/émissions CO_2 biogénique selon contenu carbone dans le combustible	Inclus	Inclus	Inclus	Non pertinent
		Contribution aux autres enjeux environnementaux (émissions de particules, acidification de l'air…)	Inclus	Inclus	Exclu	
	Autres étapes du cycle de vie (aval à celle de la gestion sylvicole)	Contribution à l'ensemble des enjeux environnementaux (y compris GES)	Inclus	Inclus	Exclu	
		Contribution au changement climatique	Inclus	Inclus	Inclus	
Lot 2	Gestion sylvicole	Captations/émissions de carbone liées aux changements d'usage des sols[15]	Exclu	Exclu	Inclus	
		Captations/émissions de carbone liées aux changements des pratiques sylvicoles	Exclu	Exclu	Inclus	

PARTIE 1 : ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE DIFFERENTES FILIERES BOIS ENERGIE

1. Champ et objectifs de l'évaluation

1.1. Informations préliminaires à la définition des scénarios

1.1.1. Introduction

Les principaux termes utilisés tout au long de la présente partie sont décrits dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Termes utilisés dans la partie 1

Terminologie	Description
Gestion sylvicole et récolte du bois (*)	Toutes les étapes de gestion sylvicole : de la production éventuelle de plant en pépinière en passant par l'arbre planté (ou régénération naturelle) et allant jusqu'à la mise à disposition du bois en bord de route.
Itinéraire de préparation	L'itinéraire de préparation correspond aux différentes étapes qui permettent de transformer la matière première (bois en bord de route) en combustible utilisable par les chaufferies.
Usage	L'usage de la chaleur fait référence à l'utilisation finale qui est faite de la chaleur (chauffer des logements, alimenter des processus industriels ou alimenter des unités de cogénération).
Combustible	Le combustible fait référence au produit final qui va être brulé pour produire de l'énergie. Il est souvent défini par l'origine du bois et un itinéraire de préparation spécifique.
Filière	La filière fait référence à l'ensemble du système qui comprend le combustible (et sa préparation) et la production de l'énergie pour un certain usage.

(*) A noter que les étapes considérées diffèrent en fonction des scénarios/variantes étudiés.

Les grandes étapes prises en compte dans le champ de l'évaluation sont :

- la gestion sylvicole, la récolte et le transport du bois du bord de route vers la plateforme de préparation ;
- la préparation et le transport du combustible ;
- la production de l'énergie en chaufferie.

1.1.2. Gestion sylvicole

La gestion sylvicole se différencie dans le cadre de cette étude par :

- Le type d'essence : douglas, châtaigner, chêne, eucalyptus.

[15] Exemple une déprise agricole qui devient une forêt.

- Le type de produits récoltés : bois d'œuvre (BO), bois d'industrie et bois d'énergie (BIBE), menus bois (MB), souches.
- Les étapes pouvant être considérées selon les scénarios/variantes : dessouchage, mise en andains, mise à disposition des plants et transport, plantation, fertilisation, éclaircie, coupe finale, démembrement du houppier, débardage, évacuation des souches.

À noter que les étapes considérées diffèrent en fonction des scénarios/variantes étudiés.

Les systèmes considérés sont détaillés dans le Tableau 47.

1.1.3. Types de combustibles et étapes de préparation

Les combustibles bois énergie peuvent se différencier en quatre catégories telles que définies dans les référentiels ADEME[16] :

1. *Les plaquettes forestières et assimilées (Catégorie 1)*
    - Les plaquettes forestières (1A) ;
    - Les plaquettes bocagères ou agroforestières (1B) ;
    - Les plaquettes paysagères ligneuses (résiduelles) (1C) ;
2. *Les connexes et sous-produits de l'industrie de la première transformation (Catégorie 2)*
    - Les écorces (2A) ;
    - Les plaquettes de produits de connexes de scierie et assimilés (2B) ;
3. *Le bois en fin de vie et bois déchet (Catégorie 3)*[17]
    - Les déchets de bois d'emballage SSD[18] (3A)[19] ;
    - Les déchets de bois issus d'ameublement, de menuiserie et d'emballage sans SSD, bois issus de la démolition et autres bois bruts (3B) [20] ;
4. *Les granulés (Catégorie 4)*
    - Les granulés de bois (4A) ;
    - Les granulés d'origine agricole (4B) ;
    - Les granulés de bois traités thermiquement ou « black pellets » (4C).

L'ensemble des combustibles sont listés ci-dessus mais tous ne sont pas étudiés dans le cadre de cette étude (cf. Tableau 8).

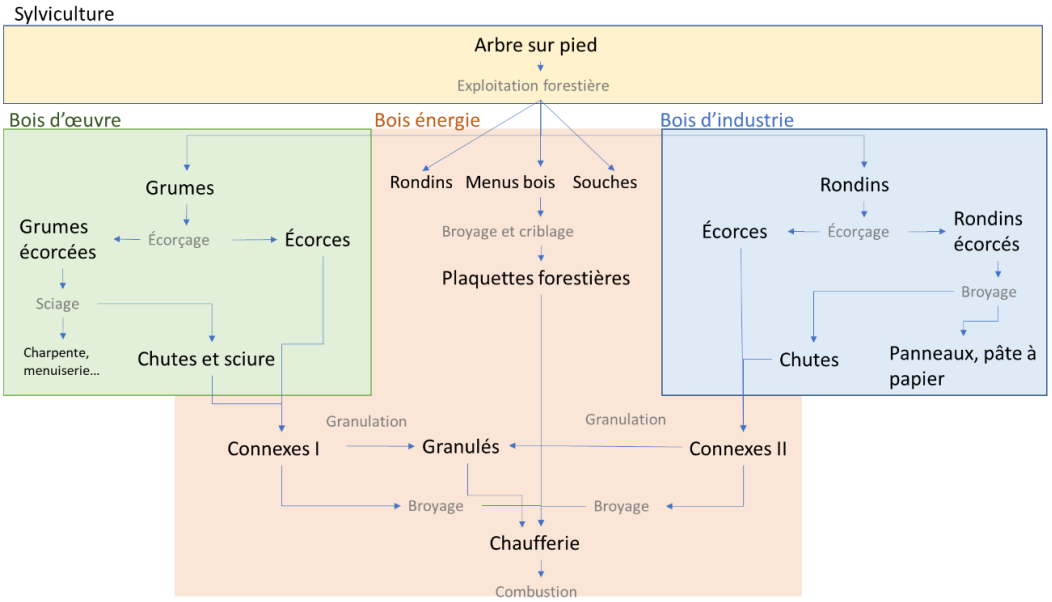
Au sein d'une catégorie de combustible, il existe plusieurs sources possibles de bois forestier ainsi que plusieurs modes de préparation faisant intervenir différentes étapes (séchage, transport, criblage, etc.).

Les différentes sources de bois forestier sont liées aux pratiques de gestions sylvicoles.

La figure ci-dessous présente de manière synthétique les différents devenirs possibles du bois forestier.

Figure 1 : Les différents devenirs possibles du bois forestier

[16] https://www.ademe.fr/referentiels-combustibles-bois-energie-lademe
[17] Les autres sous-catégories ne sont pas traitées dans le champ de l'étude.
[18] SSD : Sortie du statut de déchets
[19] Ce type de déchets est traité via la filière « Déchets de bois propre »
[20] Ce type de déchets est traité via la filière « Déchets de bois adjuvanté »



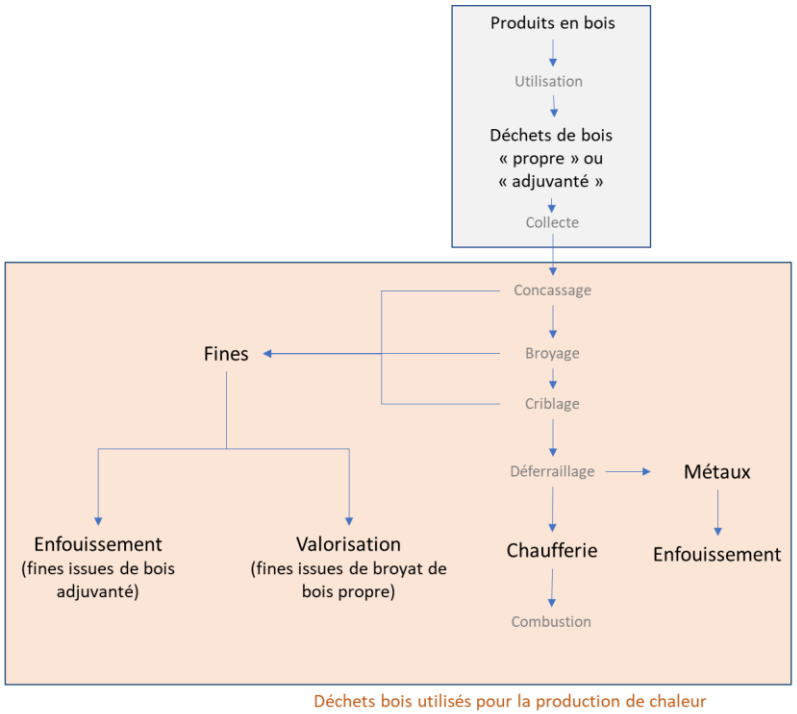
Dans cette étude, les termes sont utilisés sous les définitions suivantes :

- Grume : tronc coupé dirigé vers l'exploitation en bois d'œuvre (BO), diamètre 18-30 cm selon les essences.
- Rondin : tronc ou branche, dirigé à la fois vers le bois d'industrie et bois énergie (BIBE), diamètre 7-20 cm.
- Menus bois : diamètre < 7 cm

Les plaquettes forestières peuvent être produites à partir de différents types de récolte : soit la récolte de l'arbre entier (rondins de tronc et de branches + menus bois), soit la récolte du houppier entier (rondins de branches + menus bois), ou uniquement la récolte des rondins de tronc et/ou de branches. Les souches sont par ailleurs toujours récoltées séparément.

De la même manière, le cycle de vie des déchets en bois utilisés pour la production de chaleur (déchet bois) est illustré dans la Figure 2.

Figure 2 : Cycle de vie des déchets de bois « propre » ou « adjuvanté » issus de produits en bois



Le tableau ci-dessous résume, pour chaque combustible, les étapes de préparation qui peuvent y être associées.

Tableau 5 : Synthèse des itinéraires de préparation possibles pour les combustibles

Combustibles	Sous-catégorie	Matières	Étapes de préparation possibles[21]	Combustibles finaux possibles
Bois forestier, bocager et d'élagage (catégorie 1)	Plaquettes forestières (1A)	Rondins	Stockage en bord de route forestière ou sur plateforme, broyage, criblage, séchage (forcé ou naturel)	Plaquettes forestières sèches (PFS), Plaquettes forestières humides (PFH)
		Arbres entiers ou houppiers entiers (rondins et menus bois ensemble)		
		Rémanents (menus bois et souches)		
	Plaquettes bocagères ou agroforestières (1B)	Arbres bocagers sur pied		Plaquettes bocagères sèches (PBS), Plaquettes bocagères humides (PBH)
	Plaquettes paysagères ligneuses (résiduelles) (1C)	Plaquettes urbaines d'élagage humides non calibrées Arbres paysagers sur pied		Plaquettes paysagères sèches (PPS), Plaquettes paysagères humides (PPH)
		Branches		Broyats d'élagage humides
	Autre catégorie non spécifiée dans le référentiel	Refus de compostage humides non calibrés		Refus de compostage humides
Produits connexes de scierie de la première transformation (catégorie 2) et de la seconde transformation du bois	Première transformation du bois : écorces (2A)	Écorces humides non calibrées	Stockage, broyage(s), criblage	Écorces humides
	Première transformation du bois : plaquettes de produits de connexes de scierie et assimilés (2B)	Délignures (sèches), dosses, chutes humides non calibrées		Produits divers selon l'activité de l'industrie (copeaux, plaquettes, chutes de panneaux…) Plaquettes de scierie sèches (PSS), Plaquettes de scierie humides (PSH)
	Seconde transformation du bois		Stockage, broyage(s), criblage, séchage (forcé ou naturel)	Plaquettes de scierie sèches (PSS), Plaquettes de scierie humides (PSH)
Bois en fin de vie (catégorie 3)	Déchets de bois d'emballage SSD (3A)	Déchets de bois d'emballage SSD[22] secs non calibrés	Stockage, concassage, broyage, déferraillage, criblage	Broyats SSD de bois en fin de vie
	Déchets de bois issus d'ameublement, de menuiserie et d'emballage sans SSD (3B)	Déchets de bois issus d'ameublement, secs non calibrés (DEA)		Autres broyats de bois en fin de vie
Granulés (catégorie 4)	Granulés de bois (4A)	Granulés issus de connexes ou préparés directement à partir de bois ronds[23]	Séchage, granulation et conditionnement	Granulés blancs français

Note : Tous les itinéraires de préparation ne sont pas étudiés dans la suite de l'étude (cf. Tableau 8).

[21] Certaines étapes sont facultatives, d'autres peuvent être répétées à plusieurs étapes du procédé. Ce tableau a pour objectif de présenter les caractéristiques principales de la préparation du combustible.
[22] SSD : Sortie du statut de déchets
[23] Actuellement 80 % des granulés proviennent de connexes et 20 % de bois forestier.

1.1.4. Types de chaufferie

Les types de chaufferie se distinguent par :

- le type d'usage :
  - *besoins climatiques* : production de chaleur destinée à chauffer des logements ou des locaux d'activités tertiaires,
  - *processus industriels* : production de chaleur destinée à être utilisée dans les processus industriel,
  - *cogénération* : production de chaleur et de l'électricité ;
- la puissance des chaufferies :
  - 0 à 0,5 MW,
  - 0,5 à 5 MW,
  - 5 à 20 MW,
  - 20 à 100 MW ;
- les équipements :
  - le type de fluide utilisé :
    - eau chaude,
    - vapeur,
    - huile thermique ;
  - le type de traitement des fumées :
    - multi-cyclone (MC),
    - électrofiltre (EF),
    - filtre à manches (FAM),
    - foyer bas NOx,
    - réduction sélective non catalytique (oxydes d'azote) (SNCR) à base d'ammoniac,
    - traitement à la chaux (gaz acides),
    - traitement au charbon actif (dioxines et furanes).

1.1.5. Combinaisons possibles entre le type de chaufferie et le combustible

Les types de combustibles utilisés dans les chaufferies dépendent des caractéristiques techniques de celles-ci. Le tableau ci-dessous synthétise pour les différents types de chaufferie les combustibles admis.

Tableau 6 : Synthèse des chaufferies biomasse

Usage	Gamme de puissance	Combustibles habituels	Autres combustibles
Besoins climatiques (chauffage de bâtiments résidentiels/tertiaires et de locaux d'entreprises)	0 à 0,5 MW	PFS, PBS, PSS, granulés	PFH, PBH, PSH
	0,5 à 5 MW	PFH, PBH, PSH, broyats SSD, broyats d'élagage, mélange écorces/broyat SSD	PFS, PBS, PSS, granulés
	5 à 20 MW	PFH, PBH, broyats d'élagage, mélange écorces/broyat SSD, PSH, broyat SSD	PFS, refus de compostage
Processus industriels	0,5 à 5 MW	PFH, PBH, broyats d'élagage, mélange écorces/broyat SSD, PSH, broyat SSD	PFS, PBS, PSS, granulés
	5 à 50 MW	PFH, PBH, broyats d'élagage, mélange écorces/broyat SSD, PSH, broyat SSD	PFS, refus de compostage
	20 à 100 MW		
Cogénération	0,5 à 1 MW	PFH, PBH, PSH, broyats SSD, broyats d'élagage, mélange écorces/broyat SSD	PFS, PBS, PSS, granulés
	1 à 3 MW	PFH, PBH, broyats d'élagage, mélange écorces/broyat SSD, PSH, broyat SSD	PFS, refus de compostage
	3 à 25 MW		

Note : Ce tableau synthétique n'a pas pour objectif de présenter l'ensemble des paramètres qui peuvent caractériser les combustibles ou les chaufferies mais d'offrir une vision des différentes combinaisons possibles.

1.2. Scénarios étudiés

1.2.1. Scénarios étudiés dans le cas de base

Un scénario est défini sur la base d'une combinaison de trois types de caractéristiques :

- un mono-combustible[24] (cf. chapitre 1.1.3) ;
- un mode de production (cf. chapitre 1.1.2) et de préparation (cf. chapitre 1.1.3) ;
- une chaufferie (cf. chapitre 1.1.4).

Au vu du grand nombre d'options possibles pour chaque caractéristique, il en ressort un nombre élevé de scénarios.

Afin de faciliter l'appropriation des résultats de cette étude, un nombre limité de scénarios a été défini en accord avec le COTECH en vue de répondre aux questionnements principaux de l'étude (cf. Tableau 1).

Les scénarios retenus sont présentés dans le tableau suivant. Ils sont représentatifs de la filière en France métropolitaine et ont été sélectionnés afin :

- *(i) d'identifier pour chaque scénario les étapes du cycle de vie les plus contributrices aux différents enjeux environnementaux et cela dans une perspective d'écoconception d'une filière bois énergie ;*
- *(ii) de permettre de comparer certains[25] scénarios entre eux.*

[24] La présente étude considère que les chaufferies sont alimentées par un unique type de combustible. Dans la pratique, les chaufferies sont souvent alimentées par plusieurs types de combustibles.

[25] La présente étude n'a pas pour objet de permettre la comparaison de l'ensemble des scenarios entre eux. Les scenarios pouvant faire l'objet d'une comparaison sont mentionnés dans le Tableau 9.

Tableau 7 : Scénarios retenus en cas de base – Partie 1

N°	Combustible	Sylviculture/Essence	Mode de préparation	Caractéristiques de la chaufferie			
				Puissance	Dépoussiérage	SNCR	Autres traitements
S1	Bois forestiers	Taillis de feuillus (châtaignier)[26]	Plaquettes forestières calibrées sèches (séchage naturel), à partir d'arbres entiers feuillus ou de rondins d'arbres entiers feuillus d'un diamètre relativement faible	Réseau de chaleur : 0 à 0,5 MW	MC	Non	Non
S2	Bois forestiers	Taillis de feuillus (châtaignier)[26]	Plaquettes forestières humides à partir d'arbres entiers feuillus ou de rondins d'arbres entiers feuillus d'un diamètre relativement faible	Réseau de chaleur : 0,5 à 5 MW	MC + EF/FAM	Non	Non
S3[27]	Produits connexes de l'industrie	Non inclus	Connexes de l'industrie de première transformation du bois (écorces ou chutes issues de scierie ou papeterie) utilisés directement sur le site	Process industriel : 5 à 50 MW[28]	MC + EF/FAM	Oui	Non
S4	Déchets bois « propre »	Non inclus	Broyats SSD criblés	Réseau de chaleur : 0,5 à 5 MW	MC + EF/FAM	Non	Non
S5	Déchets bois « adjuvanté »	Non inclus	Broyats criblés sans SSD	Process industriel : 5 à 50 MW	MC + EF/FAM	Oui	Gaz acides et dioxines
S6	Granulés blancs français	Non inclus	Granulés blancs français (issus de connexes de scierie – unité de production des granulés intégrée)	Réseau de chaleur : 0 à 0,5 MW	MC	Non	Non
S7	Bois forestiers	Taillis de feuillus (châtaignier)[26]	Plaquettes forestières humides à partir d'arbres entiers feuillus ou de rondins d'arbres entiers feuillus d'un diamètre relativement faible	Chaufferie collective : 5 à 20 MW	MC + EF/FAM	Non	Non
S8				**Process industriel** : entre 5 et 50 MW	MC + EF/FAM	Non	Non
S9				**Cogénération** : entre 0,5 et 3 MWé	MC + EF/FAM	Non	Non

* MC : multi-cyclone ; EF : électrofiltre ; FAM : filtre à manche

Les scénarios S1 à S6 permettent d'identifier les étapes du cycle de vie les plus contributrices aux différents enjeux environnementaux dans une perspective d'écoconception d'une filière bois énergie.

Certains combustibles ont été écartés de l'analyse pour les raisons suivantes :

- le mode de préparation du combustible est similaire à un autre combustible déjà sélectionné ;
- ils sont peu représentatifs de la filière en France métropolitaine.

Les raisons sont reprises dans le tableau ci-dessous. Les combustibles non considérés sont surlignés en gris et italique.

Les scénarios S7 à S9 ont été sélectionnés pour permettre de comparer l'utilisation d'un même combustible dans différents types d'installation et pour différents usages.

Tableau 8 : Raison principale de la non-sélection des combustibles étudiés

Combustibles	Sous-catégorie	Combustibles finaux possibles	Raison principale de la non prise en compte
Bois forestier, bocager et d'élagage (catégorie 1)	Plaquettes forestières (1A)	Plaquettes forestières sèches (PFS)	/
		Plaquettes forestières humides (PFH)	/

[26] La représentativité du scénario « Taillis de châtaigner » défini comme cas de base est précisée en Annexe 18 : Représentativité des scénarios

[27] Le scénario 3 a évolué au fil du temps. Initialement, il correspondait à une installation brûlant des écorces en scierie (la plage de puissance considérée était alors 5-20 MW), sans SNCR. À l'issue d'échange avec le COTECH, il a évolué pour intégrer l'industrie du papier. La chaudière brûle toujours des écorces mais est d'une taille plus conséquente (élargissement de la plage de 5–50 MW), dans un cadre réglementaire différent (rubrique 3110 des ICPE et non plus 2910 du fait de la présence de chaudières brûlant des liqueurs noires) avec des contraintes vraisemblablement plus strictes sur les émissions d'où la prise en compte d'un traitement des NOx via SNCR.

[28] À noter que dans le cadre d'une papeterie, la puissance est généralement supérieure à 50 MW.

Combustibles	Sous-catégorie	Combustibles finaux possibles	Raison principale de la non prise en compte
	Plaquettes bocagères ou agroforestières (1B)	*Plaquettes bocagères sèches (PBS)*	*Similitudes dans le mode de préparation avec les plaquettes forestières.* *Non couvert par le lot 2*
		Plaquettes bocagères humides (PBH)	
	Plaquettes paysagères ligneuses (résiduelles) (1C)	*Plaquettes paysagères sèches (PPS)*	*Peu représentatif de la filière*
		Plaquettes paysagères humides (PPH)	
		Broyats d'élagage humides	
	Autre catégorie non spécifiée dans le référentiel	*Refus de compostage humides*	*L'étude se focalise sur le bois forestier*
Produits connexes de scierie (ou papeterie) de la première transformation (catégorie 2) et de la seconde transformation du bois	Première transformation du bois : écorces (2A)	Écorces humides	/
	Première transformation du bois : plaquettes de produits de connexes de scierie et assimilés (2B)	*Plaquettes de scierie sèches (PSS)*	*Étudié à travers la filière « Granulés »*
		Plaquettes de scierie humides (PSH)	*Étudié à travers la filière « Granulés »*
	Seconde transformation du bois par exemple panneaux ou industrie papetière[29]		/
Bois en fin de vie (catégorie 3)	Déchets de bois d'emballage SSD (3A)	Broyats SSD de bois en fin de vie	
	Déchets de bois issus d'ameublement, de menuiserie et d'emballage sans SSD (3B)	Autres broyats de bois en fin de vie sans SSD et classés non dangereux	/
Granulés (catégorie 4)	Les granulés de bois (4A)	*Granulés issus directement de bois forestier*	*Peu représentatif de la filière*[30]
		Granulés blancs français issus de connexes	/
	Les granulés d'origine agricole (4B)	*Granulés d'origine agricole*	*Exclu du champ de l'étude*
	Les granulés de bois traités thermiquement ou « black pellets » (4C)	*Black pellets*	*Non représentatif de la situation française* *Aucune installation industrielle en fonctionnement*

Le tableau suivant synthétise les scénarios étudiés et les questionnements (cf. chapitre 4) auxquels chaque scénario est associé.

Tableau 9 : Lien entre les questionnements principaux de l'étude et les scénarios

Questionnements			Scénarios comparés
	Q3	Quelle est la contribution de la production d'énergie à partir de plaquettes forestières aux différents enjeux environnementaux[31]?	S1 et S2

[29] Non repris dans les catégories du référentiel ADEME
[30] < 20 % à dire d'expert (ADEME) contre 80 % de représentativité pour les granulés issus de connexes.
[31] Y compris les contributions relatives à la gestion et l'exploitation forestière

	Q4	Quelle est la contribution de la production d'énergie à partir de granulés (issus de connexes de scierie) aux différents enjeux environnementaux ?	S6
	Q5	Quelle est la contribution de la production d'énergie à partir de connexes (écorces ou chutes issues de scierie ou papeterie) aux différents enjeux environnementaux?	S3
	Q6	Quelle est la contribution de la production d'énergie à partir de déchets de bois « propre » (SSD) aux différents enjeux environnementaux ?	S4
	Q7	Quelle est la contribution de la production d'énergie à partir de déchets de bois « adjuvanté » (sans SSD) aux différents enjeux environnementaux ?	S5
	Q8	Quelle est la contribution de la production d'énergie à partir de plaquettes forestières aux différents enjeux environnementaux en fonction du type d'installations de production de chaleur (chaufferie ou unité de cogénération) et de l'usage (climatique ou process) ?	S7 vs. S9 S8 vs. S9

1.2.2. Variantes étudiées par rapport au scénario de base

Les scénarios de base étudiés dans le cadre de cette étude font l'objet de variantes afin de répondre aux questionnements additionnels présentés dans le Tableau 10 et le Tableau 11. Certaines variantes pourraient être mises en œuvre dans plusieurs scénarios. Dans un souci de favoriser une meilleure appropriation de l'ensemble des résultats de l'étude, il a été décidé de privilégier le caractère illustratif plutôt qu'exhaustif de la démarche.

Les questionnements additionnels sont classés en deux catégories :

- influence des variabilités des systèmes rencontrés dans les différentes filières bois énergie (cf. Tableau 10) ;
- influence des choix méthodologiques appliqués (cf. Tableau 11).

Tableau 10 : Questionnements associés aux variantes – Variabilité des systèmes rencontrés

Questionnements		Scénario de base
Quelle est l'influence sur la contribution aux différents enjeux environnementaux des changements suivants réalisés dans la filière de production d'énergie à partir de plaquettes forestières ?		S1
	• Mise en œuvre d'un séchage forcé en lieu et place d'un séchage naturel	
	• Mise en œuvre d'un broyage sur une plateforme industrielle en lieu et place d'un broyage en bord de route	
Quelle est l'influence sur la contribution aux différents enjeux environnementaux des changements suivants réalisés dans la filière de production d'énergie à partir de plaquettes forestières ?		S2
	• Distance de transport accrue vers la chaufferie	
	• Émissions supérieures à la réglementation	
	• Émissions conformes à la nouvelle réglementation	
	• Mise en place d'une unité de condensation	
	• Présence du traitement des fumées « SNCR »	

Questionnements		Scénario de base
Quelle est l'influence sur la contribution aux différents enjeux environnementaux des changements suivants réalisés dans la filière de production d'énergie à partir de connexes (écorces ou chutes issues de scierie ou papeterie) ?		S3
	• Construction d'une chaufferie d'une puissance supérieure à 50 MW	
Quelle est l'influence sur la contribution aux différents enjeux environnementaux des changements suivants réalisés dans la filière de production d'énergie à partir de granulés (issus de connexes de scierie) ?		S6
	• Utilisation de granulés blancs originaires du continent <u>américain</u> en lieu et place de granulés blancs d'origine <u>française</u> ○ L'utilisation de granulés blancs américains engendre les changements suivants dans les étapes du cycle de vie considérées : ○ ajout d'un transport routier ; ○ ajout d'un transport maritime. ○ À noter que d'autres différences peuvent exister entre les granulés français et les granulés américains mais elles ne sont pas prises en compte dans le cadre de cette étude (type de ressources forestières utilisées, type d'énergie utilisé pour la granulation, etc.).	
	• Utilisation de gaz comme combustible pour alimenter la chaufferie utilisée pour produire la chaleur nécessaire pour le séchage des connexes	S6
	• Mise en œuvre d'une unité de cogénération (alimentée par de la biomasse) pour produire la chaleur nécessaire au séchage des connexes	
Quelle est l'influence sur la contribution aux différents enjeux environnementaux des changements suivants réalisés dans la filière de production d'énergie à partir de plaquettes forestières ?		S2
	Type de peuplement	
	Type de produits récoltés	
	Type de sylviculture	

Tableau 11 : Questionnements associés aux variantes – Variabilité des choix méthodologiques – Partie 1

Questionnements		Scénario de base
Quelle est l'influence des choix de modélisation suivant sur la contribution de la production d'énergie aux différents enjeux environnementaux ?		
	• Méthode de résolution de la multifonctionnalité liée à la production de différents types de bois lors de la gestion sylvicole	S2
	• Méthode de résolution de la multifonctionnalité liée à la production de différents types de bois lors de la transformation	S6
	• Méthode de résolution de la multifonctionnalité liée à la production conjointe de chaleur et d'électricité en cogénération	S9

2. Méthodologie d'évaluation environnementale

L'évaluation environnementale réalisée dans le cadre de cette étude est basée sur l'analyse du cycle de vie (ACV).

2.1. Description de la méthodologie d'analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie est un des outils le plus abouti en matière d'évaluation globale et multicritère des impacts environnementaux. Cette méthode normée par les normes ISO 14 040 : 2006 et 14 044 : 2006 permet de mesurer les effets quantifiables de produits ou de services sur l'environnement.

C'est un outil d'aide à la décision. Ses résultats peuvent être utilisés pour des besoins d'écoconception[32], d'affichage environnemental ou encore d'orientation des politiques publiques. L'objectif de l'ACV est de présenter une vision globale des impacts potentiels générés par les produits (biens, services ou procédés) tout au long de la vie d'un produit, c'est à dire de la production des matières premières jusqu'à sa gestion en fin de vie (on parle alors d'analyse du berceau à la « tombe » ou *cradle-to-grave*).

Un produit est fabriqué à partir de matières premières et d'énergie, il est utilisé, puis éliminé en fin de vie. L'ACV établit un bilan quantitatif de tous les flux entrants (eau, énergie, matières premières) et sortants (eau, air, déchets), à chaque étape du cycle de vie d'un produit. Ceci permet d'identifier un grand nombre d'impacts (ou pollutions) sur l'environnement.

C'est une méthode d'évaluation multi-étapes (production des matières premières, transport, fabrication du produit, distribution, utilisation et fin de vie) et multicritères (impacts sur les écosystèmes, impacts sur les ressources et impacts sur la santé).

Figure 3 : Illustration schématique des étapes du cycle de vie

Utilisée comme outil d'écoconception, elle permet d'identifier les éventuels transferts de pollution d'une phase du cycle de vie à une autre et/ou d'un indicateur environnemental à un autre lorsque diverses solutions sont envisagées.

L'ACV est un processus itératif (chaque phase peut amener à une révision des phases précédentes) et comprend quatre phases :

1. Définition des objectifs et du champ de l'étude ;
2. Inventaire ;
3. Évaluation de l'impact ;
4. Interprétation.

La phase 1 permet de définir quels sont les objectifs de l'ACV, en précisant quelle(s) application(s) il en sera faite(s) : écoconception, comparaison de produits ou services, ou déclaration environnementale.

La cible de l'étude est précisée à ce stade, ainsi que la manière dont seront divulgués les résultats (pour des affirmations comparatives par exemple).

Le champ de l'étude doit par ailleurs préciser les fonctions du produit étudié, l'unité fonctionnelle choisie (voir ci-dessous), les frontières du système étudié (étapes/procédés à prendre en compte, cf. phase 2) et les limites de l'étude (méthodologiques en grande partie). C'est aussi à ce stade que les différentes règles pour les calculs appliqués à l'étude sont arrêtées.

À **la phase 2,** chaque système est décomposé en plusieurs procédés unitaires. Chacun de ces procédés correspond à une action précise dans la filière. Ces procédés mis bout à bout conduisent à l'élaboration d'un arbre de procédés pour chaque système.

[32] Prise en compte du critère environnemental pour améliorer la performance environnementale d'un produit ou d'un service tout au long de son cycle de vie.

Chaque procédé unitaire est caractérisé par une multitude de flux élémentaires entrants et sortants (CO_2, SO_2, NO_x, PO_4, Fe, Ag, Au, etc.) généralement issu d'une collecte de données permettant de déterminer les intrants (consommation d'eau, d'énergie, de matières premières, etc.) et les sortants (émissions dans l'air, dans l'eau, les sols, déchets et produits et co-produits générés par le processus).

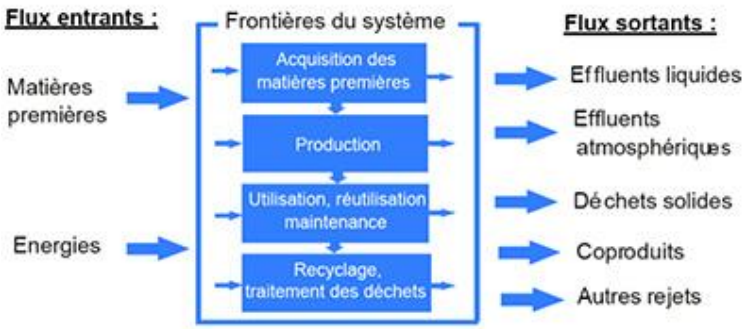


Figure 4 : Illustration schématique d'un procédé unitaire caractérisé par des flux entrants et sortants (source : ADEME).

On appelle cette démarche « inventaire du cycle de vie ». L'inventaire est donc une comptabilité analytique des flux.

Une fois les procédés identifiés, leur intégration va permettre de reconstituer l'ensemble de la chaîne. La construction de l'arbre des procédés est progressive et part de **l'unité fonctionnelle**, c'est-à-dire la fonction remplie par le système étudié, par exemple « emballer 1 litre de marchandises ».

L'évaluation des impacts à la phase 3 consiste à calculer la performance environnementale d'un système en utilisant les indicateurs de catégorie d'impact sélectionnés. Ces indicateurs de catégories d'impact se basent sur des modèles d'évaluation scientifiques. Plusieurs modèles d'évaluation des impacts sont disponibles dans la littérature. L'évaluation des impacts consiste en trois à six sous-étapes :

- de manière obligatoire :
  - la sélection des indicateurs de catégorie d'impact et des modèles de caractérisation,
  - la classification, c'est-à-dire une affectation de l'ensemble des flux élémentaires collectés dans l'inventaire du cycle de vie (ICV) aux catégories d'impact,
  - la caractérisation, résidant en un calcul de la contribution de chaque flux élémentaire pour les différents indicateurs de catégorie d'impact et en une agrégation de l'ensemble des contributions pour un même indicateur (un même enjeu environnemental) ;
- de manière optionnelle :
  - la normalisation, consistant en une multiplication des résultats d'impact par des facteurs de normalisation, afin d'exprimer les résultats de différentes catégories d'impact dans une même unité de référence,
  - le regroupement, consistant à trier ou classer les indicateurs selon certains choix de valeurs,
  - la pondération, résidant en la multiplication des résultats des impacts environnementaux (agrégation) par un facteur de pondération qui reflète l'importance relative donnée à chaque catégorie d'impact.

Ces étapes sont illustrées et précisées plus en détail dans l'Annexe 9.

Sur le plan pratique, de nombreuses méthodes d'évaluation, incluant les sous-étapes mentionnées ci-dessus, sont disponibles et opérationnelles. Il est à noter que l'ISO 140 44 : 2006 ne spécifie pas de méthodologie spécifique ni n'appuie les choix de valeurs sous-jacents utilisés pour regrouper les catégories d'impact.

Lors de l'interprétation des résultats à la phase 4, les phases du cycle de vie, les procédés et les flux qui contribuent le plus aux différents enjeux environnementaux sont identifiés. Des actions peuvent être menées afin de prévenir ou limiter les impacts. L'approche ACV multicritère contribue en outre à éviter, ou au moins à limiter au maximum, les transferts de pollutions (d'un enjeu environnemental vers une autre et d'une phase du cycle de vie vers une autre) lors de la prise de décision.

2.2. Unité fonctionnelle

L'ACV est une approche relative car les résultats sont toujours exprimés en fonction d'une unité fonctionnelle. Toutes les analyses réalisées au cours de l'étude dépendront donc de celle-ci. L'unité fonctionnelle définit les fonctions du système étudié et la performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie.

L'unité fonctionnelle définie pour cette partie est la suivante :

Produire 1 MWh_{th} d'énergie en sortie d'un système de production de chaleur.

Fonction(s) assurée(s)/service(s) rendu(s) : « quoi »	Produire de l'énergie en sortie d'un système de production de chaleur.
Ampleur de la fonction ou du service : « combien »	Un mégawattheure thermique d'énergie.
Niveau de qualité souhaité : « comment »	De la croissance de la biomasse à la production d'énergie en sortie de chaufferie (avant distribution sur le réseau).
Durée d'usage du produit : « combien de temps »	*Non pertinent*[33]

2.3. Frontières des systèmes étudiés

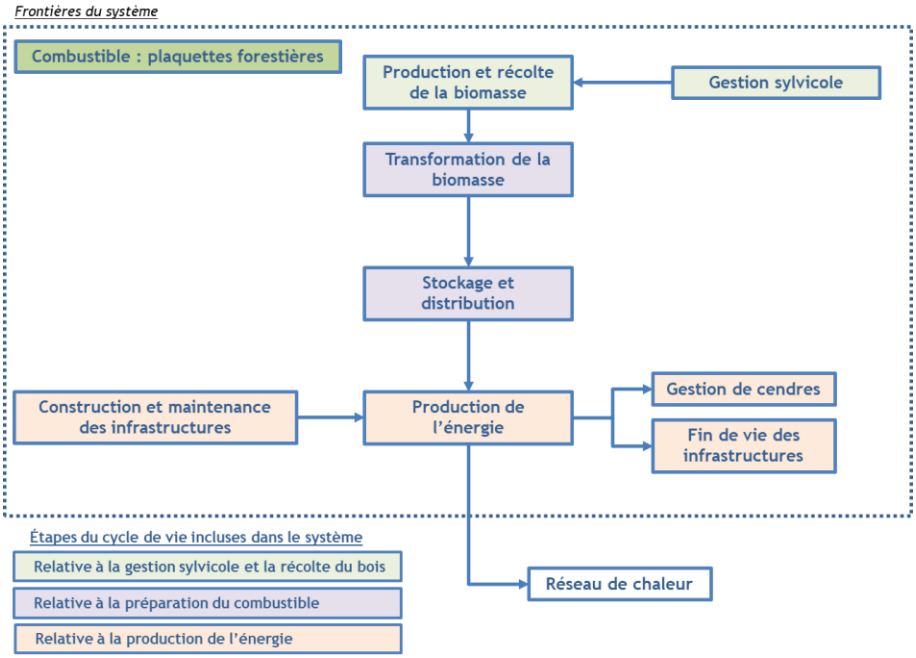
Les périmètres pris en compte dans l'étude pour chaque type de combustible sont présentés ci-dessous :

- la Figure 5 décrit le périmètre des scénarios S1, S2, S7, S8 et S9 ;
- la Figure 6 décrit le périmètre des scénarios S3 et S6 ;
- la Figure 7 décrit le périmètre des scénarios S4 et S5.

Les figures se veulent illustratives et non pas exhaustives. Les différents transports possibles ne sont pas représentés sur celles-ci.

Dans le cadre de cette étude, nous nous arrêtons à la fourniture de la chaleur à l'entrée du réseau de chaleur[34]. Le réseau de chaleur utilisé pour la distribution est donc exclu de l'analyse pour l'ensemble des combustibles étudiés.

Figure 5 : Périmètre de l'étude pour le bois forestier (S1, S2, S7, S8, S9)[35]

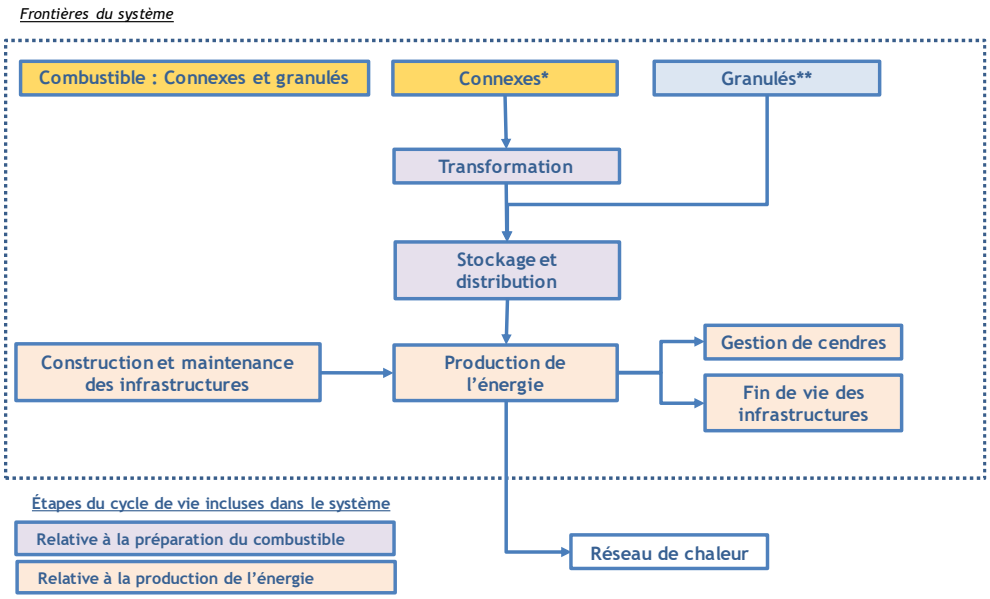


[33] Critère destiné dans la pratique ACV aux produits à longue durée de vie

[34] Un réseau de chaleur (ou réseau de chauffage urbain) est un système de distribution de chaleur à partir d'une installation de production centralisée et à destination de plusieurs consommateurs. La chaleur est transportée au sein d'un ensemble de canalisations, généralement à l'échelle d'un quartier.

[35] Le réseau de distribution **est exclu du champ de l'étude**. À titre d'information, les pertes de chaleur dues dans le réseau sont estimées dans la littérature entre 6 et 8 % (source : Rapport Ecoinvent 6-XIV, Wärme-Kraft-Kopplung, 2007).

Figure 6 : Périmètre de l'étude pour les connexes et les granulés (S3 et S6)[35]

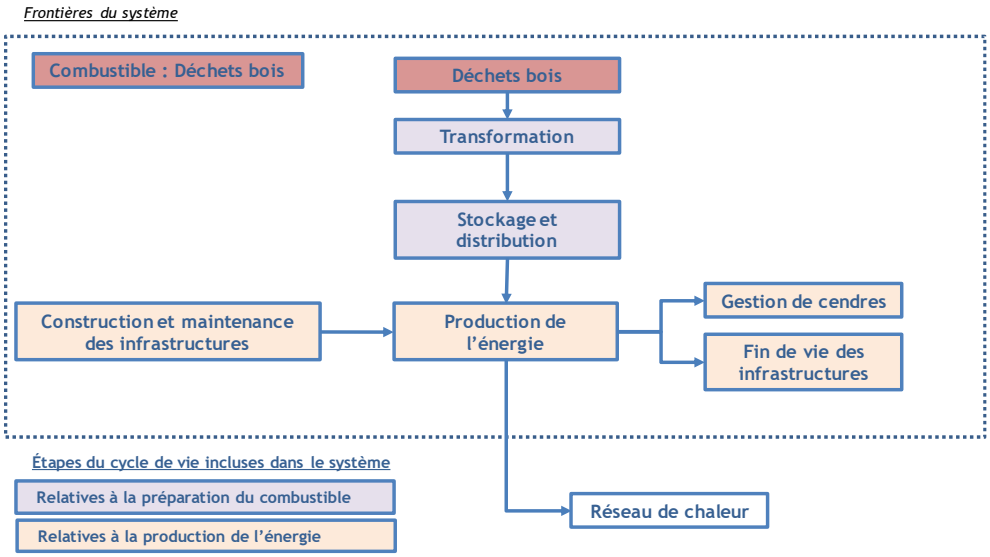


* : En cas de base, comptabilisation des impacts à partir du transport depuis la scierie. Les connexes sont produits à partir des écorces.

Lors de l'analyse de variantes, comptabilisation à partir de la gestion sylvicole.

** : Les granulés sont produits à partir de connexes de scierie directement sur le site de la scierie (unité de production géographiquement intégrée).

Figure 7 : Périmètre de l'étude pour les déchets bois (S4 et S5)[35]



Les étapes du cycle du vie prises en compte sont détaillées dans les tableaux ci-dessous pour chaque filière.

Les cases grisées sont les étapes qui sont exclues de l'analyse en cas de base pour l'une ou l'autre des raisons suivantes :

- étapes non-discriminantes entre scénarios ;
- allocation à un autre système.

Tableau 12 : Description des étapes du cycle de vie étudiées – Bois forestier

Étapes du cycle de vie			Processus inclus	Processus exclus	S1 (PFS[36])	S2 & S7-S8-S9 (PFH[37])
Gestion sylvicole et récolte du bois	Approvisionnement en matière première (MP)	Production de la MP	Gestion et exploitation forestière [38]	Production et maintenance des engins d'exploitation[39]	X	X
		Récolte de la MP	Débardage[40] Évacuation des souches	Stockage en bord de route	X	X
Transformation	Préparation des plaquettes forestières	Broyage en bord de route	Production du broyeur Consommation de gasoil lors du broyage Transport du broyeur de chantier en chantier	-	X	X
		Transport de la MP vers la plateforme	Consommation de gasoil Production du camion Infrastructures Entretien	-	X	
		Séchage naturel	Dégradation de la matière	Infrastructure	X	
		Criblage	Production du crible Transport du crible Consommation de gasoil Traitement des fines	-	X	
Stockage et distribution		Transport jusqu'à la chaufferie	Consommation de gasoil Production du camion Infrastructures Entretien	-	X	X
Utilisation	Combustion	Combustion en chaufferie	Émissions atmosphériques	-	X	X
		Traitement des émissions	Production des réactifs nécessaires au traitement	-	X	X
		Consommation d'énergie pour le fonctionnement[41]	Consommation d'électricité	-	X	X
		Infrastructures[41]	Production des infrastructures Fin de vie des infrastructures	Maintenance[39]	X	X
		Gestion des cendres	Collecte Épandage Enfouissement	-	X	X
Distribution via un réseau de chaleur						

[36] Plaquettes forestières sèches calibrées
[37] Plaquettes forestières humides
[38] Les étapes inclues dans l'analyse varient entre le cas de base et les variantes. Le cas de base n'inclut que l'exploitation.
[39] La contribution au changement climatique d'une heure de maintenance est de 0,9 gCO_2eq/h et la contribution à l'utilisation de ressources fossiles est de 0,013 MJ eq/h (ecoinvent : market for maintenance, stirling heat and power co-generation unit, 3kW electrical, wood pellet, future, GLO v3.5). Sur cette base, il a été décidé d'exclure cette étape de l'analyse et de ne pas collecter de la donnée spécifique.
[40] Transport des bois après abattage et façonnage depuis le lieu où ils ont été abattus jusqu'en bordure d'une voie carrossable.
[41] Dans les résultats, cette étape est reprise dans "Chaufferie – consommation"

Tableau 13 : Description des étapes du cycle de vie étudiées – Connexes (écorces ou chutes issues de scierie ou papeterie) utilisés directement sur site

Étapes du cycle de vie			Processus inclus	Processus exclus
Gestion sylvicole et récolte du bois	Approvisionnement en matière première (MP)	Production de la MP	Gestion et exploitation forestière	
		Récolte de la MP	Débardage	
Transformation	Préparation du bois pour d'autres usages (papeterie ou scierie)	Transport de la MP	Consommation de gasoil Production du camion Infrastructures Entretien	-
		Transformation sur site (papeterie ou scierie)	Sciage, écorçage Production de pâte à papier	
	Préparation des connexes (à partir d'écorces ou chutes) pour la chaufferie	Broyage	Consommation de gasoil ou d'électricité Production du broyeur	-
Utilisation	Combustion	Combustion en chaufferie	Émissions atmosphériques	-
		Traitement des émissions	Production des réactifs nécessaires au traitement	-
		Consommation d'énergie pour le fonctionnement[41]	Consommation d'électricité	-
		Infrastructures[41]	Production des infrastructures Fin de vie des infrastructures	Maintenance[39]
		Gestion des cendres	Épandage Enfouissement	-
Distribution via un réseau de chaleur				

Tableau 14 : Description des étapes du cycle de vie étudiées – Granulés issus de connexes de scierie (production géographiquement intégrée[42])

Étapes du cycle de vie			Processus inclus	Processus exclus
Gestion sylvicole et récolte du bois	Approvisionnement en matière première (MP) – bois constituant le granulé	Production de la MP	Gestion et exploitation forestière	
		Récolte de la MP	Débardage	
	Approvisionnement en matière première (MP) – bois constituant le combustible (écorce/palette)	Production de la MP	Sylviculture (nurserie, éclaircie), exploitation forestière Production et maintenance des engins d'exploitation	
		Récolte de la MP	Débardage	
Transformation	Préparation du bois pour d'autres usages (bois d'œuvre)	Transport de la MP	Consommation de gasoil Production du camion Infrastructures Entretien	-
		Ecorçage - sciage	Consommation de gasoil Consommation d'électricité Infrastructures	Lubrifiant
		Rabotage	Consommation de gasoil Consommation d'électricité Infrastructures	Lubrifiant
		Broyage	Consommation d'électricité	-
	Préparation du combustible (broyat de palette)	Broyage	Consommation d'électricité	-
	Préparation granulés	Séchage	Consommation de chaleur (Combustible utilisé : écorces et broyat de palettes)	-
		Granulation	Consommation de gasoil Consommation d'électricité	-
Stockage et distribution	Transport des granulés	Transport jusqu'à la chaufferie	Consommation de gasoil Production du camion Infrastructures Entretien	-
Utilisation	Combustion	Combustion en chaufferie	Émissions atmosphériques	-
		Traitement des émissions	Production des réactifs nécessaires au traitement	-
		Consommation d'énergie pour le fonctionnement[41]	Consommation d'électricité	-
		Infrastructures[41]	Production des infrastructures Fin de vie des infrastructures	Maintenance[39]
		Gestion des cendres	Épandage Enfouissement	-
Distribution via un réseau de chaleur				

[42] Utilisation des connexes de sciage et de rabotage générés par la scierie comme matières premières pour la fabrication des granulés.

Tableau 15 : Description des étapes du cycle de vie étudiées – Bois déchets « propre » et « adjuvanté »

Étapes du cycle de vie			Processus inclus	Processus exclus
Gestion sylvicole et récolte du bois	Approvisionnement en matière première (MP)	Production de la MP		
		Prélèvement de la MP		
		Transport de la MP		
Production de produit	Transformation			
	Distribution et stockage			
Utilisation	Traitement divers			
Fin de vie du produit	Collecte des déchets et transport vers lieu de préparation			
Transformation	Préparation des déchets bois	Broyage	Consommation de gasoil Traitement des fines	Traitement des métaux[43]
		Chargeur		
		Concassage		
		Criblage		
		Déferraillage		
Stockage et distribution		Transport jusqu'à la chaufferie	Consommation de gasoil Production du camion Infrastructures Entretien	-
Utilisation	Combustion	Combustion en chaufferie	Émissions atmosphériques	-
		Traitement des émissions	Production des réactifs nécessaires au traitement	-
		Consommation d'énergie pour le fonctionnement[41]	Consommation d'électricité	-
		Infrastructures[41]	Production des infrastructures Fin de vie des infrastructures	Maintenance[39]
		Gestion des cendres	Épandage Enfouissement	-
Distribution via un réseau de chaleur				

[43] Le traitement des métaux est exclu de l'analyse car seule la fraction biomasse est considérée dans le cadre de cette étude.

2.4. Enjeux environnementaux

2.4.1. Introduction

Chaque étude d'ACV peut constituer son propre panel d'indicateurs de catégorie d'impact relatifs aux différents enjeux environnementaux, en accord avec les objectifs visés. Toutefois, afin d'assurer la pertinence de l'évaluation réalisée, trois critères minimaux sont à respecter :

- La complétude, c'est-à-dire que chaque enjeu environnemental d'intérêt vis-à-vis de l'objectif de l'étude doit être couvert par les catégories prises en compte ;
- La non-redondance, c'est-à-dire que les indicateurs de catégorie d'impact sélectionnés doivent être indépendants entre eux et éviter les doubles comptages afin de ne pas introduire de biais dans l'interprétation ;
- La validité scientifique, c'est-à-dire que pour chaque indicateur sélectionné :
  - le mécanisme environnemental doit être clairement identifié,
  - le modèle de caractérisation sous-jacent doit être accepté et reconnu scientifiquement, si possible à l'échelle internationale. Le choix d'un modèle pour un indicateur donné peut être fait selon différents critères, tels que :
    - la couverture géographique du modèle, qui peut influer sur la modélisation des mécanismes environnementaux ;
    - le niveau d'évaluation, indicateur midpoint (effets intermédiaires) ou indicateur endpoint (effets finaux – dommages) ;
    - le nombre de substances considérées et renseignées dans le modèle ;
    - la validité scientifique de la modélisation ;
    - le caractère récent ou non des connaissances scientifiques prises en compte.

2.4.2. Enjeux couverts par l'étude

Les enjeux environnementaux et les indicateurs de catégorie d'impact potentiel associés qui sont étudiés dans le cadre de cette étude, sont ceux recommandés et diffusés par la Commission européenne dans le document *« Product Environmental Footprint Category Rules Guidance, Version 6.3, May 2018 »*[44] généralement mentionnés comme étant relatif à la version EF 2.0. Ces indicateurs d'impacts ont été sélectionnés par le Joint Research Centre (JRC) sur base des travaux en cours au niveau international (ex : UNEP SETAC) et européen.

Les indicateurs de catégorie d'impact potentiel relatifs à la toxicité ont fait l'objet de nouveaux développements et ont été publiés fin 2018 (EF 3.0.). Ces méthodes n'ayant fait l'objet d'aucune mise en œuvre sur des cas réels, ils ne seront pas étudiés dans la présente étude.

Afin de faciliter l'appropriation des résultats de l'étude, les résultats sont présentés de manière détaillée pour un nombre limité d'enjeux environnementaux (et donc d'indicateurs de catégorie d'impact). Pour les catégories d'impact jugées comme moins pertinentes, les résultats sont repris uniquement en Annexe 11.

Les enjeux environnementaux pertinents pour l'étude sont sélectionnés sur base du système de normalisation/pondération des résultats proposé par la Commission européenne dans le cadre des travaux PEF[44].

[44] http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/PEFCR_OEFSR_en.htm

Tableau 16 : Indicateurs d'impacts potentiels (EF 2.0)

Catégorie d'impact	Modèle	Unité	Source	Classification
Changement climatique	Bern model – Global Warming potentials (GWP) over a 100-year time horizon	kg CO_2 eq	Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013 Facteurs EC-JRC 2017	I
Appauvrissement de la couche d'ozone	EDIP model based on the ODPs of the World Meteorological Organization (WMO) over an infinite time horizon	kg CFC-11 eq	WMO, 1999 Facteurs EC-JRC 2017	I
Émissions de particules	UNEP recommended model	Incidence de maladie	Fantke et al, 2016 EC-JRC 2017	I
Rayonnement ionisant	Human Health effect model	kBq U^{235} eq	Dreicer et al., 1995 EC-JRC 2012	II
Formation d'ozone photochimique	LOTOS-EUROS model	kg NMVOC eq	Van Zelm et al., 2008 as applied in ReCiPe EC- JRC 2012	II
Acidification	Accumulated Exceedance model	mol H+ eq	Seppälä et al., 2006; Posch et al., 2008 EC-JRC, 2012	II
Eutrophisation terrestre	Accumulated Exceedance model	mol N eq	Seppälä et al., 2006; Posch et al., 2008 EC-JRC, 2012	II
Eutrophisation de l'eau douce	EUTREND model	kg P eq	Struijs et al., 2009b EC-JRC, 2012	II
Eutrophisation marine	EUTREND model	kg N eq	Struijs et al., 2009b EC-JRC, 2012	II
Utilisation des terres	LANCA	Sans dimension	Beck et al. 2010 EC-JRC, 2017 Bos et al. 2016	III
Épuisement de la ressource en eau	Swiss Ecoscarcity model	m^3 d'eau eq	Frischknecht et al., 2008	III
Utilisation des ressources minérales et métalliques	CML 2002 model ADP ultimate reserves	kg Sb eq.	Van Oers et al., 2008 CML-IA method v. 4.8 (2016)	III
Utilisation des ressources fossiles	CML 2002 model ADP fossil	MJ	Van Oers et al., 2008 CML-IA method v. 4.8 (2016)	III

La classification selon la robustesse déterminée par le JRC est la suivante :

I	Recommandé et satisfaisant
II	Recommandé, mais qui a besoin d'améliorations
III	Recommandé, mais à appliquer avec prudence
Interim	En développement

Focus sur l'enjeu du changement climatique - Spécificités des systèmes forestiers vis-à-vis de l'enjeu du changement climatique

Au-delà de l'émission de gaz à effet de serre liée à la combustion de carburants fossiles lors de l'exploitation forestière, les systèmes forestiers peuvent contribuer ou atténuer le changement climatique selon différents processus :

- Bilan GES des systèmes forestiers : les systèmes forestiers échangent chaque année d'importantes quantités de gaz à effet de serre avec l'atmosphère, captant du CO_2 par l'action de la photosynthèse, émettant du CO_2 par la respiration, et relâchant des gaz à effet de serre par la décomposition naturelle et la combustion des produits prélevés issus de la forêt. Ces échanges de GES dépendront des conditions pédoclimatiques et des pratiques de gestion sylvicole mises en place : La gestion sylvicole, intervenant directement sur les accroissements biologiques et les stocks de carbone, ainsi que l'augmentation ou la diminution des surfaces forestières peuvent avoir une incidence, positive ou négative, sur le rôle de la biosphère en tant que puits de carbone et sur l'albédo terrestre.
- L'usage des sols intégrant les changements d'affectation des sols et les changements des pratiques sylvicoles : les changements d'affectation des sols (l'augmentation ou la diminution des surfaces forestières) et les changements des pratiques sylvicoles modifient les stocks de carbone maintenus dans les écosystèmes et les produits bois, et peuvent donc avoir une incidence, positive ou négative, sur le rôle de la biosphère en tant que puits de carbone. Des variations de stocks de carbone dans les écosystèmes/produits bois correspondent à des émissions de CO_2 (variation de stock négative) ou à séquestration de CO_2/puits de carbone (variation de stock positive).

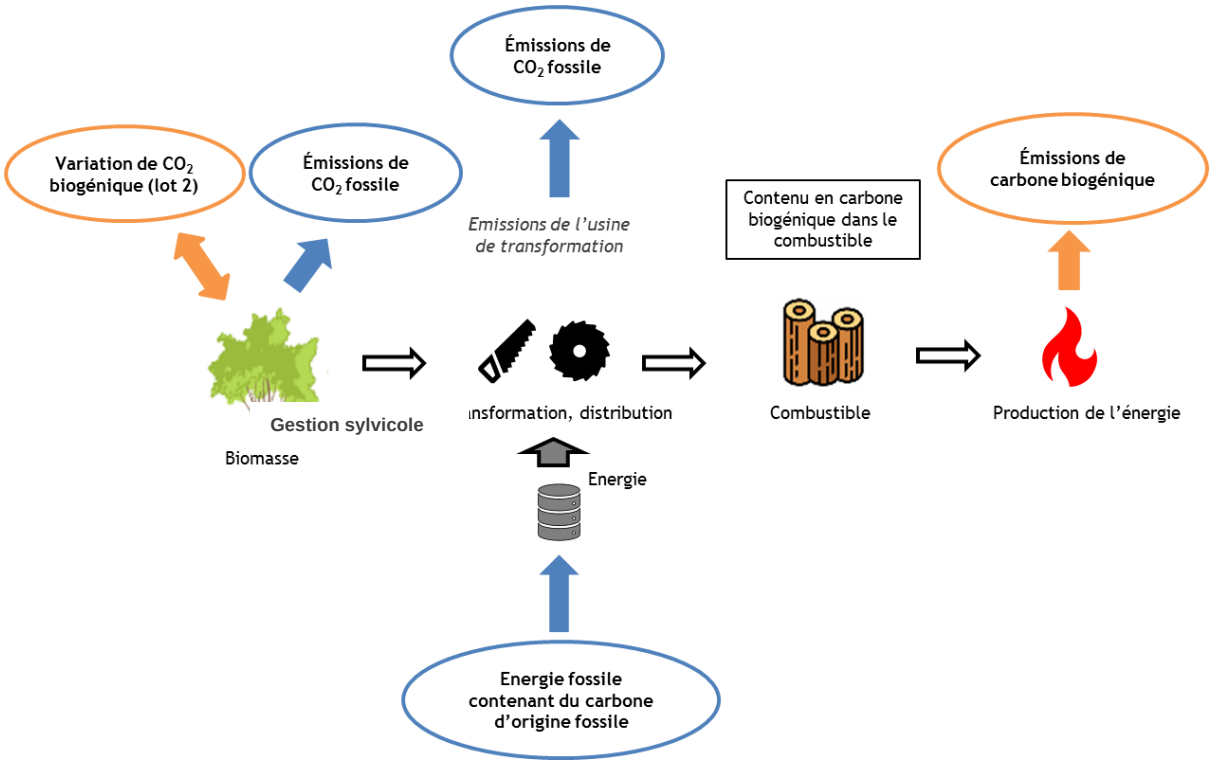
Ces deux éléments sont étudiés dans la partie 3 de l'étude. Les impacts sur l'albédo n'ont pas été étudiés car ils ont été exclus des inventaires par manque de données disponibles.

- L'émission d'agents de forçage de court terme : la forêt est une source naturelle de COV tels que les terpènes ;

  Ils sont exclus des inventaires liés au système sylvicole utilisés dans le cadre de cette étude par manque de données disponibles.

- Les sols forestiers sont généralement des puits de méthane, de par la "consommation" de méthane atmosphérique par les microorganismes des sols qui l'oxydent. La gestion sylvicole (choix des essences, âge des peuplements, pratiques qui tassent les sols, etc.) peut influencer cette "consommation" de méthane[45]. Ce phénomène n'est pas pris en compte dans le cadre de cette étude.

Figure 8 : Cycle du carbone



Le modèle de caractérisation des impacts sur le changement climatique recommandé dans le cadre des travaux PEF ne caractérise pas les émissions de CO_2 d'origine biogénique. Étant donné les objectifs de l'étude et plus spécifiquement du lot 2, il a été décidé de modifier les facteurs de caractérisation pour celui-ci (cf. ligne surlignée dans le tableau ci-dessous). Les facteurs utilisés sont repris dans le tableau ci-dessous. Les facteurs représentent le potentiel de réchauffement global considéré pour chaque flux émis/capté.

Tableau 17 : Facteurs de caractérisation utilisés pour le modèle de caractérisation des impacts sur le changement climatique (source : PEF 2.0) – Liste non exhaustive

Flux/Polluant	Compartiment	Facteur de caractérisation (kg éq CO_2/kg)
Monoxyde de carbone (fossile)	Émission dans l'air	1,57
Monoxyde de carbone (biogénique)	Émission dans l'air	1,57
Monoxyde de carbone (usage des sols)	Émission dans l'air	1,57
Dioxyde de carbone (fossile)	Émission dans l'air	1
Dioxyde de carbone (biogénique)	*Ressources (air)*	*-1*
Dioxyde de carbone (biogénique)	*Émission dans l'air*	*1*
Dioxyde de carbone (usage des sols)	Ressources (air)	-1
Dioxyde de carbone (usage des sols)	Émission dans l'air	1
Méthane (fossile)	Émission dans l'air	36,8

[45] Epron D., Plain C., Lerch T., Ranger J., 2016. Les sols forestiers, puits de méthane: un service écosystémique méconnu. Revue Forestière Française

Méthane (biogénique)	Émission dans l'air	36,8
Méthane (usage des sols)	Émission dans l'air	36,8

Il est à noter que l'indicateur d'impacts « Changement climatique » comporte trois sous indicateurs :

- Émissions de GES d'origine fossile.
- Émissions de GES d'origine biogénique.
- Émissions de GES liées à l'usage des sols.

L'indicateur total (agrégé) a été présenté dans le cadre de document.

2.4.3. Enjeux exclus de l'étude

La filière bois énergie, telle qu'étudiée dans le présent document, peut mobiliser dans certains scénarios/variantes, des compartiments de bois jusqu'alors laissés en forêt tels qu'un pourcentage de récolte des menus bois ou souches. Ces compartiments ont une teneur élevée en éléments minéraux, influençant par conséquent la fertilité minérale des sols et ils offrent par ailleurs un abri et une source de nourriture à de multiples organismes qui concourent au bon fonctionnement de l'écosystème. De plus, le développement de la filière bois énergie peut conduire à une modification des pratiques sylvicoles ayant une influence sur la qualité des écosystèmes.

Néanmoins, l'influence de la filière bois énergie sur les enjeux environnementaux suivants[46] n'est pas considérée dans le cadre de cette étude :

- la fertilité minérale des sols ;
- la biodiversité ;
- le tassement des sols ;
- l'érosion des sols ;
- la préservation des eaux et zones humides en forêt.

Le projet GERBOISE[46] a permis certaines avancées sur ce sujet mais la méthode d'analyse du cycle de vie ne permet pas de prendre en compte de manière quantitative ses avancées de façon robuste dans l'évaluation.

[46] Voir le projet GERBOISE (https://www.ademe.fr/gerboise-gestion-raisonnee-recolte-bois-energie) pour plus d'information sur ces enjeux

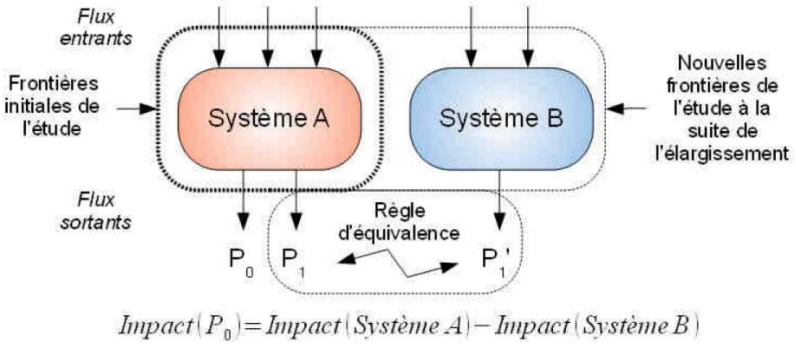
2.5. Multifonctionnalité et problèmes d'affectation

2.5.1. Introduction

De nombreux processus sont multifonctionnels, c'est-à-dire qu'ils fournissent plusieurs produits ou plusieurs services. Si, dans le cadre d'une ACV, une seule de ces fonctions est d'intérêt pour le système d'étude, se pose alors un problème d'affectation : le praticien doit fixer une règle comptable pour n'imputer qu'une part des flux économiques entrants et des flux élémentaires à la fonction d'intérêt. Pour cela, plusieurs solutions sont possibles :

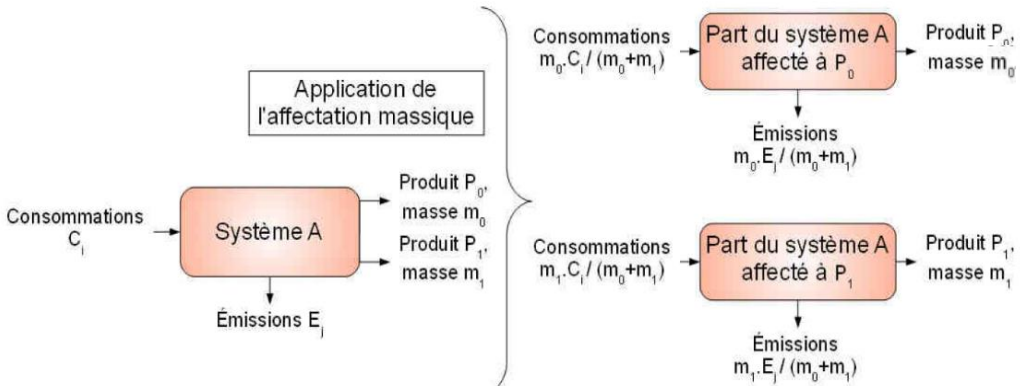
- En premier lieu, il convient de vérifier si l'affectation peut être évitée, soit en subdivisant le processus unitaire afin de pouvoir éventuellement distinguer des sous-processus indépendants, soit en élargissant le système afin d'inclure les co-fonctions au système d'étude.

Figure 9 : Principe de résolution d'une affectation par élargissement du système : cas d'une substitution (ADEME 2015[47])



- Si l'affectation ne peut être évitée, il est recommandé d'affecter les flux de manière à refléter de potentielles relations physiques entre ceux-ci et les différentes fonctions du processus. Par exemple, dans le cas du traitement conjoint de différents déchets par incinération, les flux d'émissions soufrées ne sont alloués qu'au traitement de déchets contenant du soufre.
- Enfin, en dernier recours, l'affectation peut être réalisée au prorata d'un paramètre donné :
  - prioritairement physique, tel que la masse ou le contenu énergétique,
  - ou sinon de tout autre type tel que la valeur économique.

Figure 10 : Principe de résolution d'une affectation par prorata : cas d'une affectation massique (ADEME 2015[48])



2.5.2. Résolution des multifonctionnalités liées aux systèmes étudiés

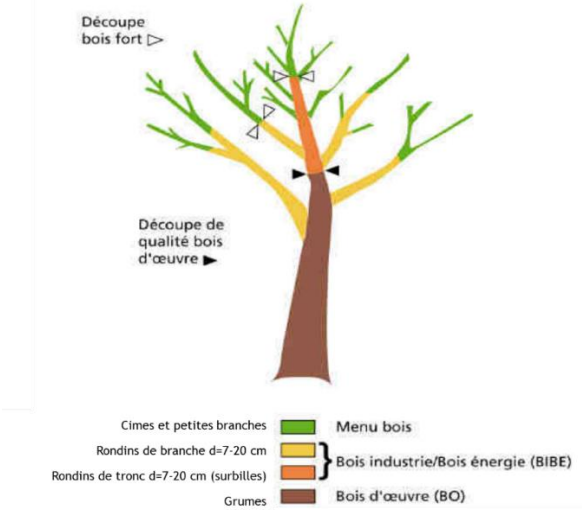
Les systèmes bois énergie sont concernés par les multifonctionnalités suivantes :

- En termes de gestion sylvicole, étant donné :

[47] Etude préliminaire à la réalisation de bilans environnementaux sur le chauffage au bois – Partie 1 – ADEME Novembre 2015
[48] Etude préliminaire à la réalisation de bilans environnementaux sur le chauffage au bois – Partie 1 – ADEME Novembre 2015

- la production de différents types de bois, de différentes qualités et pour différentes finalités comme présenté à la Figure 11,

Figure 11 : Localisation dans l'arbre des principales classes et compartiments de bois : bois d'œuvre, bois d'industrie/bois énergie, et menus bois (adaptée de Colin 2009)



- la mise à disposition d'un espace récréatif pour le public (cet élément n'est pas considéré dans le cadre de cette étude),
- les services écosystémiques rendus par la forêt tel que le maintien d'habitats pour la biodiversité ou l'épuration des eaux (cet élément n'est pas considéré dans le cadre de cette étude).

- En termes de transformation du bois, étant donné la production lors de celle-ci de différents types de sous-produits (écorce, sciure, chutes, etc.).
- En termes de services énergétiques, étant donné la production de chaleur et d'électricité lors de la cogénération.

Dans le cadre de cette étude, les affectations sont réalisées telles que décrites dans le Tableau 18.

Tableau 18 : Résolution de la multifonctionnalité – Partie 1

Étapes du cycle de vie concernées		Résolution des multifonctionnalités dans *le cas de base*	Résolution des multifonctionnalités dans *les variantes*
Gestion sylvicole	Production des différents types de bois	Affectation volumique	Affectation économique
	Mise à disposition d'un espace récréatif	Exclu du champ de l'étude	Exclu du champ de l'étude
	Services écosystémiques	Exclu du champ de l'étude	Exclu du champ de l'étude
Transformation du bois	Connexes	Gestion sylvicole exclue du champ de l'étude	Pas de variante étudiée
	Granulés	Gestion sylvicole exclue du champ de l'étude	Gestion sylvicole inclue (affectation sur base du taux d'écorce sur rondins)
Services énergétiques	Cogénération	Élargissement des frontières du système	Affectation – contenu énergétique[49]

2.6. Approche suivie : attributionnelle

L'analyse du cycle de vie réalisée dans le cadre du lot 1 suit les principes de modélisation de la situation A de l'ILCD Handbook[50] « Aide à la décision basée sur le cycle de vie au niveau micro ».

[49] Conformément aux recommandations du paragraphe 16 de l'Annexe V – partie C de la Directive (UE) 2018/ 2001 du 11 décembre 2018 – relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables
[50] ILCD Handbook; General guidance for Life Cycle Assessment – Detailed guidance; Commission européenne; 2010

Ce choix de situation implique que les décisions éventuellement prises par le commanditaire de l'étude sur base de celle-ci, auront des conséquences mineures sur le système et le marché en lui-même.

L'étude réalisée dans le cadre du lot 1 ne pourra pas par exemple conclure sur la meilleure filière de traitement du bois en fin de vie ou encore l'impact du développement de la production de chaleur à partir de la biomasse sur le mix énergétique français.

2.7. Critères de coupure

Les efforts de modélisation et de collecte de données sont donc portés sur les éléments influençant le plus les résultats. En pratique, nous allons procéder de manière itérative pour la collecte de données comme il est recommandé dans l'ILCD Handbook et les normes ISO 14 040 : 2006 et 14 044 : 2006 :

- Première itération : des valeurs par défaut (intervalles de valeurs) fournies par les acteurs ayant une vision globale de la problématique, des bases de données secondaires ou des hypothèses conservatrices ont été utilisées pour identifier, de façon automatique et exhaustive, les paramètres de modélisation importants.
- Deuxième itération : les données qui ont un impact non négligeable ont été affinées via des contacts avec les acteurs de terrain.

2.8. Méthodologie suivie pour fiabiliser les résultats de l'évaluation environnementale

Les résultats d'une ACV comparative peuvent être utilisés pour des besoins d'écoconception ou encore d'orientation des politiques publiques (à petite ou grand échelle). Toutefois, il est à noter que des approches conséquentielles peuvent être plus pertinentes pour définir des politiques publiques à plus grande échelle.

Afin de fiabiliser les résultats et de présenter des conclusions riches (intégrant la complexité du système) et nuancées (pas uniquement le résultat moyen) pour un scénario mais aussi pour une comparaison de scénarios, il convient lors de la réalisation de l'analyse du cycle de vie de procéder à :

- la caractérisation de la qualité des données utilisées (cf. Annexe 10.1) ;
- l'évaluation chiffrée des incertitudes (cf. Annexe 10.1.2) et l'influence sur les résultats (cf. Annexe 10.3.1) ;
- des analyses de sensibilité (cf. Annexes 5.3.1, 5.3.2 et 5.3.3).

Selon la norme ISO 14 044 : 2006, l'analyse d'incertitude est une procédure pour déterminer comment les incertitudes sur les données utilisées et les hypothèses formulées dans le modèle d'évaluation environnementale influencent la fiabilité des résultats.

L'analyse de sensibilité est quant à elle une procédure pour déterminer comment les changements dans les données et les choix méthodologiques influencent les résultats. La définition présentée dans la norme fait donc référence plus à une analyse de la variabilité ou à une analyse de scénario.

Il est à noter que l'utilisation des concepts d'analyse de sensibilité et d'incertitude n'est pas appliqué de manière cohérente par la communauté ACV. Dans un souci de clarté, les concepts suivants sont distingués dans le cadre de cette étude :

- Analyses d'incertitude

  Elles représentent le degré de méconnaissance, celui-ci pouvant évoluer par l'acquisition de connaissances au cours de l'étude (via le processus itératif de l'ACV).
- Analyses de sensibilité

  Les analyses de sensibilité sont des analyses complémentaires aux analyses d'incertitudes (et peuvent se baser sur les résultats des analyses d'incertitude).

  Elles sont conduites pour répondre aux objectifs suivants :
  - Analyser dans quelle mesure la variation de valeur de certaines données d'entrée peut faire changer les résultats d'un scénario ou la comparaison des résultats de différents scénarios. Il s'agit dans ce cas-ci, de la variabilité intrinsèque des systèmes.
  - Analyser dans quelle mesure la variation de certains choix méthodologiques peut faire changer les résultats d'un scénario ou la comparaison des résultats de différents scénarios.
  - Les choix méthodologiques se rapportent par exemple à la gestion des multifonctionnalités, au type de modélisation (attributionnel ou conséquentiel), etc.
  - Identifier des pistes d'éco-conception pour un système donné.

2.9. Précautions de lecture et d'utilisation des résultats de cette étude

Les ACV appliquent une méthode spécifique d'analyse environnementale qui fournit des connaissances sur les enjeux environnementaux. Leur apport, potentiellement très riche, est néanmoins conditionné par le type de résultats qu'elles fournissent d'une part, et par l'état de leur mise en pratique d'autre part.

- La modélisation de la fonction étudiée entraîne une spécificité telle que les résultats et conclusions fournis par une étude ACV sont rarement directement extrapolables (hypothèses de modélisation formulées, données utilisées, etc.) à un contexte qui diffère de celui défini dans une étude.

  Parmi les données de modélisation variables, il faut distinguer :
  - les variabilités liées aux conditions locales intrinsèques (type de combustibles utilisés en chaufferie, distance d'approvisionnement, mode de préparation, etc.),
  - les variabilités liées aux paramètres technologiques maîtrisables (technique d'épuration des fumées, etc.).

  Si les conclusions restent stables quand les paramètres maîtrisables le sont ou quelques soient les conditions locales, alors on a une généralisation possible. Si les conclusions varient en fonction des conditions locales, alors il n'y a pas de généralisation possible à l'ensemble des situations françaises possibles.
- Les résultats d'une étude ACV sont inévitablement caractérisés par une incertitude liée à la difficulté de définition et de modélisation d'une réalité complexe : plusieurs sources d'émissions, plusieurs types de milieux récepteurs (air, eau, sol, etc.), etc. C'est pourquoi, des hypothèses simplificatrices sont faites et des valeurs moyennes doivent être prises.

  Les conclusions d'une étude ACV sont, comme pour toute discipline scientifique, liées à l'évolution des connaissances, notamment concernant cette réalité complexe.

  Cette incertitude influence potentiellement fortement le domaine de validité des résultats. Elle ne réduit cependant pas la fiabilité des résultats de l'ACV pour autant que les résultats soient suffisamment cernés au moyen d'analyses de sensibilité.
- La fiabilité des résultats d'une étude ACV, et donc leur utilisation pour la prise de décision publique, est toutefois limitée dans le cadre de cette étude par :
  - le manque d'évaluation de certains types d'impacts : les effets sensibles à la situation locale, les effets toxiques sur les humains ou le système aquatique et les atteintes à la biodiversité et à la qualité du sol, etc.
  - la non-prise en compte d'aspects économiques et sociaux.
- Les résultats d'une étude ACV sont des expressions relatives et ne prédisent par conséquent pas les effets sur les impacts finaux (santé humaine, écosystèmes, ressources), les éventuels dépassements de seuils, les marges de sécurité ou les risques.

3. Données et hypothèses des scénarios en cas de base

3.1. Principe de collecte des données suivi

L'ensemble des données liées à la préparation du combustible et à la combustion ont été fournies par Biomasse Normandie. Les données ont été collectées auprès de différents professionnels du secteur (une liste des acteurs consultés est fournie en annexe) et ensuite traitées pour correspondre aux besoins par Biomasse Normandie. Lorsqu'aucune donnée n'était disponible, les données utilisées se basent sur l'expertise de Biomasse Normandie. L'ensemble des données utilisées a été soumis aux membres du COTECH et à différents acteurs de la filière afin d'affiner et de valider les données utilisées.

Les données liées à la croissance de la biomasse ont été fournies sous forme d'inventaire agrégé par le FCBA.

3.2. Gestion sylvicole pour la production de biomasse

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques relatives aux différentes sources de bois utilisées comme matière première pour la fabrication de combustibles.

Tableau 19 : Etapes de gestion sylvicoles considérées

		Scénarios				
		S1, S2, S7, S8, S9	S3	S4	S5	S6
Types de combustible		Plaquettes forestières	Connexes de scierie ou papeterie	Déchets de bois « propre «	Déchets de bois « adjuvanté »	Granulés issus de connexes de scierie
Sylviculture/Essence		Taillis de feuillus (châtaignier)	Non définie	-	-	Résineux - douglas
Étapes de gestion sylvicoles considérées	Dessouchage					
	Mise en andains					
	Mise à disposition des plants et transport					
	Plantation					
	Fertilisation					
	Éclaircie					
	Exploitation	x				
	Débardage	x				
	Évacuation des souches					
Produits récoltés		BI/BE + 70%MB_{pl}				

Taillis : Terme désignant un peuplement forestier caractérisé par des rejets dont la régénération s'obtient par des coupes de rajeunissement.
Mise en andains : Établissement de cordons constitués de tous les restes de coupe (branches, feuillages, souches éventuelles, etc.), que l'on aligne tous les 10 à 50 m sur 1 à plusieurs mètres de hauteur (au bull ou à la pelle mécanique), pour nettoyer le terrain et préparer ainsi la replantation.
Éclaircie : Réduction de la densité d'un peuplement non arrivé à maturité en vue d'améliorer la croissance et la forme des arbres restants.
Débardage : Transport de bois en forêt (en général jusqu'au bord de route).

Tableau 20 : Caractéristiques des combustibles

Scenario	Combustible	Masse volumique (t/map[51])	Densité anhydre [52] (sans écorce) (kg/m³)	Densité anhydre (avec écorce) (kg/m³)	Taux d'humidité initiale (% masse brute)	Taux d'humidité finale (% masse brute)	Contenu carbone (%)	PCI (MWhPCI/t brute[53])
S2, S7, S8, S9	Plaquettes forestières issues de feuillus (châtaigner)	0,36 (Biomasse Normandie)	590 (FCBA)	493 (FCBA)	45 % (FCBA)	45 %	49,4 % (FCBA)	3,04 (Biomasse Normandie)
S1	Plaquettes forestières issues de feuillus (châtaigner)	0,26 (Biomasse Normandie)	590 (FCBA)	493 (FCBA)	45 % (FCBA)	25 %	49,4 % (FCBA)	3,61 (Biomasse Normandie)
S3	Connexes issus d'écorce (ou de chutes) issues de la transformation d'arbre d'une essence non précisée	0,33	-	-	45 %	45 %	49,4 %	2,44
S4	Déchets de bois (SSD)	0,20[54]	-	-	-	20 %	49,4 %	3,98
S5	Déchets de bois (DEA)	0,20[54]	-	-	-	20 %	49,4 %	3,98
S6	Granulés	0,75[55]	-	-	45 %	8 %	49,4 %	4,86

Le PCI de chaque combustible est calculé en fonction (Annexe 4) :

- du taux d'humidité ;
- de l'essence (feuillus ou résineux[56]) ;
- du taux de cendres.

3.3. Préparation du combustible

Les combustibles étudiés dans les scénarios S1 à S9 suivent des itinéraires de préparation différents.

Le tableau suivant synthétise les principales étapes considérées pour chaque scénario.

[51] Mètre cube apparent de plaquette
[52] Humidité = 0 %
[53] C'est à dire pour le taux d'humidité considéré et le taux de cendres du combustible considéré.
[54] 20 % humidité
[55] 8 % humidité
[56] Aucune distinction n'est réalisée au sein des feuillus ou des résineux.

Tableau 21 : Etapes prises en compte pour la préparation des combustibles

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
		Plaquettes sèches	Plaquettes humides	Connexes de scierie ou papeterie	Déchets bois «propre»	Déchets bois «adjuvanté»	Granulés	Plaquettes humides	Plaquettes humides	Plaquettes humides
Broyage en bord de route		X	X					X	X	X
Transport du bord de route vers plateforme		X								
Plateforme de préparation	Séchage naturel	X								
	Concassage				X	X				
	Broyage rapide			X	X	X				
	Criblage	X				X				
Transport des connexes										
Préparation des granulés							X			
Transport vers chaufferie		X	X		X	X	X	X	X	X

3.3.1. Broyage en bord de route

Cette section décrit les données utilisées pour le broyage en bord de route à l'aide d'un broyeur mobile autoporté. Elles sont utilisées dans les scénarios suivants :

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
	Plaquettes sèches	Plaquettes humides	Connexes de scierie ou papeterie	Déchets bois «propre»	Déchets bois «adjuvanté»	Granulés	Plaquettes humides	Plaquettes humides	Plaquettes humides
Broyage en bord de route	X	X					X	X	X

Tableau 22 : Données et hypothèses relatives au broyage en bord de route

	Valeur	Unité	Source	ICV
Consommation de gasoil[57]	52,5	l/h	Biomasse Normandie d'après Biomasse Normandie et CNPF	market for diesel, low-sulfur, Europe without Switzerland, EI v3.5 (kg)
Débit	112,5	map/h		-
Masse volumique	cf. Tableau 20	t/map		-
Transport du broyeur	40	km		-
Production, maintenance, utilisation du broyeur	-	h	EcoInvent 3.5	wood chipping, mobile chipper, at forest road, RER, EI V3.5 (hour)
Taux de pertes de biomasse lors du broyage	0	Masse de broyats/masse de bois rond prélevée	Biomasse Normandie d'après Biomasse Normandie et CNPF	-

[57] Densité du gasoil : 840 kg/m³

3.3.2. Transport vers la plateforme de préparation des plaquettes

Les données décrites dans le tableau suivant représentent le transport du bois broyé depuis le bord de route vers une plateforme de préparation des plaquettes. Elles sont utilisées dans les scénarios suivants :

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
	Plaquettes sèches	Plaquettes humides	Connexes de scierie ou papeterie	Déchets bois «propre»	Déchets bois «adjuvanté»	Granulés	Plaquettes humides	Plaquettes humides	Plaquettes humides
Transport rondin en bord de route vers plateforme de préparation	X								

Tableau 23 : Données et hypothèses relatives au transport du combustible depuis le bord de route vers la plateforme de préparation des plaquettes

	Valeur	Unité	Source	ICV
Mode de transport	Camion	-	Biomasse Normandie	Cf. Annexe 5 : Modélisation du transport
Distance	40	km		
Charge réelle transportée	27	t		
Taux de retour à vide	100	%		

3.3.3. Séchage naturel

Cette section décrit les données utilisées lorsqu'un séchage naturel est considéré dans la préparation du combustible. Elles sont utilisées dans les scénarios suivants :

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
	Plaquettes sèches	Plaquettes humides	Connexes de scierie ou papeterie	Déchets bois «propre»	Déchets bois «adjuvanté»	Granulés	Plaquettes humides	Plaquettes humides	Plaquettes humides
Séchage naturel	X								

Tableau 24 : Données et hypothèses relatives au séchage naturel

	Valeur	Unité	Source	ICV
Taux d'humidité initial	45	%	Biomasse Normandie	-
Taux d'humidité final	25	%	Biomasse Normandie	-
Perte de matière anhydre (dégradation par les micro-organismes)	13	% de la masse de matière anhydre des plaquettes avant séchage	Biomasse Normandie	Émissions de CO_2b : carbon dioxide (biogenic), emissions to air, unspecified
Perte réelle d'eau	290,5	kg/t de combustible avant séchage	Biomasse Normandie	Water, Émissions to air, unspecified (m^3)
Dégradation - Émissions de COV *	0,2	g de COV/kg de matière anhydre[58]	[59] [60]	Émissions de COV dans l'air : volatile organic compound, emissions to air, unspecified

*Le bois est une matière biologiquement active. Plusieurs publications mettent en avant que lors du stockage, l'activité microbienne change et accélère la dégradation du bois. Les émissions liées à la cette dégradation contribuent au changement climatique[61].

[58] 0 % d'humidité
[59] Wu et Milota 1999, Effect of temperature and humidity on total hydrocarbon emission from Douglas-fir lumber
[60] MARCOTTE LATULIPPE A., 2006, Caractérisation des composés organiques volatils émis lors du séchage de bois
[61] Whittaker C. and al., 2016, Dry Matter Losses and Methane Emissions During Wood Chip Storage: the Impact on Full Life Cycle Greenhouse Gas Savings of Short Rotation Coppice Willow for Heat

3.3.4. Concassage

Cette section décrit les données utilisées lorsqu'un concassage (broyage lent et obtention de morceaux plus grossiers) est considéré dans la préparation du combustible.

Elles sont utilisées dans les scénarios suivants :

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
	Plaquettes sèches	Plaquettes humides	Connexes de scierie ou papeterie	Déchets bois «propre»	Déchets bois «adjuvanté»	Granulés	Plaquettes humides	Plaquettes humides	Plaquettes humides
Concassage				X	X				

Tableau 25 : Données et hypothèses relatives au concassage (broyage lent)

	Valeur	Unité	Source	ICV
Consommation de gasoil du broyeur	47,5	l/h	Biomasse Normandie (hypothèse)	market for diesel, low-sulfur, Europe without Switzerland, EI v3.5 (kg)
Consommation de gasoil du chargeur alimentant le broyeur	5	l/h		market for diesel, low-sulfur, Europe without Switzerland, EI v3.5 (kg)
Masse volumique apparente	cf. Tableau 20 + formule[62]	t/map		-
Débit	150	map/h		-

3.3.5. Broyage rapide

Cette section décrit les données utilisées lorsqu'un broyage rapide est considéré dans la préparation du combustible. Elles sont utilisées dans les scénarios suivants :

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
	Plaquettes sèches	Plaquettes humides	Connexes de scierie ou papeterie	Déchets bois «propre»	Déchets bois «adjuvanté»	Granulés	Plaquettes humides	Plaquettes humides	Plaquettes humides
Broyage rapide			X	X	X				

Tableau 26 : Données et hypothèses relatives au broyage rapide

Scénario		Valeur	Unité	Source	ICV
S3, S4, S5	Consommation de gasoil du broyeur	47,5	l/h	Biomasse Normandie (hypothèses)	market for diesel, low-sulfur, Europe without Switzerland, EI v3.5 (kg)
S3	Consommation de gasoil du chargeur alimentant le broyeur*	5	l/h		market for diesel, low-sulfur, Europe without Switzerland, EI v3.5 (kg)
S3, S4, S5	Débit	150	map/h		-
S3, S4, S5	Masse volumique	cf. Tableau 20 + formule[62]	t/map		-

*Aucune consommation de gasoil n'est considérée pour le chargeur alimentant le broyeur rapide, lorsque celui-ci est précédé du concassage (le broyeur rapide est alimenté par la sauterelle du broyeur lent) (S4 et S5).

3.3.6. Criblage

Cette section décrit les données utilisées lorsqu'un criblage est considéré dans la préparation du combustible. Elles sont utilisées dans les scénarios suivants :

[62] Masse volumique apparente (à x % humidité) *(1-x)/(1-y) avec y étant égal au nouveau taux d'humidité

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
	Plaquettes sèches	Plaquettes humides	Connexes de scierie ou papeterie	Déchets bois «propre»	Déchets bois «adjuvanté»	Granulés	Plaquettes humides	Plaquettes humides	Plaquettes humides
Criblage	X				X				

Tableau 27 : Données et hypothèses relatives au criblage (crible mobile à moteur thermique)

	Valeur		Unité	Source	ICV
	S1	S5			
Débit de criblage	150	150	map/h	Biomasse Normandie (hypothèse)	market for diesel, low-sulfur, Europe without Switzerland, EI v3.5 (kg)
Masse volumique	cf. Tableau 20 + formule[62]		t/map		-
Consommation de gasoil	10,5	10,5	l/h		market for diesel, low-sulfur, Europe without Switzerland, EI v3.5 (kg)
Consommation de gasoil du chargeur alimentant le crible	5	0 [63]	l/h		market for diesel, low-sulfur, Europe without Switzerland, EI v3.5 (kg)
Pertes de combustibles	10	15	$\%_{massique}$	Biomasse Normandie (hypothèse)	
Devenir des pertes	Retour au sol en mélange avec des composts de déchets verts [64]	Valorisation énergétique			

3.3.7. Préparation des granulés

Cette section présente les données utilisées pour la préparation des granulés (considérée uniquement comme ayant lieu à partir de connexes[65]).

Elles sont utilisées dans les scénarios suivants :

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
	Plaquettes sèches	Plaquettes humides	Connexes de scierie ou papeterie	Déchets bois «propre»	Déchets bois «adjuvanté»	Granulés	Plaquettes humides	Plaquettes humides	Plaquettes humides
Transport des connexes jusqu'à l'usine de préparation des granulés									
Préparation des granulés						X			

Les données utilisées pour la production de granulés s'appuient sur l'étude « Analyse de cycle de vie du granulé bois[66] » réalisée par le FCBA.

Le présent rapport étudie en cas de base le granulé blanc français issu de connexes de scierie (les connexes sont considérés comme un résidu de transformation en cas de base). Les étapes amont à la production des granulés ne sont pas prises en compte (cf. Tableau 13) en cas de base mais le sont dans l'analyse de variante.

Comme présenté dans le tableau ci-dessus, aucun transport n'est considéré car les granulés sont réalisés chez le scieur.

La production de granulés comporte les étapes suivantes :

- séchage ;

[63] Alimenté par la sauterelle du broyeur
[64] Aucun bénéfice d'un retour au sol des pertes de criblage n'est considéré dans le cadre de cette étude (exemple : amélioration des propriétés physiques (structure, chaleur, rétention d'eau et d'éléments minéraux, humidité, etc.), chimiques (nutrition des plantes) et biologiques (activité des micro-organismes dans la décomposition)
[65] Aujourd'hui (environ) 80 % des granulés proviennent de connexes et 20 % de bois forestier
[66] FCBA, 2012, ACV du granulé bois, étude réalisée pour SNPGB/FNB/FBF (confidentielle)

- granulation (manutention sur le site de production, broyage – affinage après séchage, pressage, refroidissement et tamisage).

Tableau 28 : Données et hypothèses relatives à la préparation des granulés – unité de production géographiquement intégrée à la scierie

		Valeur	Unité	Source	ICV
Production des granulés					
Séchage	Humidité initiale	45	%	Hypothèses sur base de FCBA, 2012, ACV du granulé bois	-
	Humidité finale	8	%		-
	Énergie thermique	2,4	MJ/ kg de granulés		
		2,6	MJ/kg anhydre		
	Combustion	Ecorces et broyat de palettes (50-50[67])			
	Cogénération	Non	-		
	Cendres	0	%		
Granulation	Humidité dans le granulé	1,1	kg de granulés/kg anhydre		-
	Électricité[68]	0,165	kWh/ kg anhydre		Électricité issue du réseau (Mix électrique FR)
	Diesel	0,00065	litre/ kg anhydre		market for diesel, low-sulfur, Europe without Switzerland, EI v3.5 (kg)

3.3.8. Transport vers la chaufferie

Cette section présente les données utilisées pour la livraison du combustible à la chaufferie. Elles sont utilisées dans les scénarios suivants :

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
	Plaquettes sèches	Plaquettes humides	Connexes de scierie ou papeterie	Déchets bois «propre»	Déchets bois «adjuvanté»	Granulés	Plaquettes humides	Plaquettes humides	Plaquettes humides
Transport vers la chaufferie	X	X	[69]	X	X	X	X	X	X

[67] Sur base du contenu énergétique.
[68] Électricité pour le fonctionnement de la chaudière et le pressage (représentant l'essentiel de la consommation).
[69] Il est considéré en cas de base que les connexes sont utilisées directement sur site.

Tableau 29 : Données et hypothèses relatives au transport vers la chaufferie

	Valeur					Unité	Source	ICV
	S1 - Plaquettes sèches	S2 S7 S8 S9 - Plaquettes humides	S4 - Déchets bois S5 - «propre»	S5 - Déchets bois «adjuvanté»	S6 - Granulés			
Distance - Camion	35	35	35	35	175	km	Biomasse Normandie et FCBA, 2012, ACV du granulé bois pour le S6	Cf. Annexe 5 : Modélisation du transport
Charge utile – Camion	11	27	27	27	27	t		-
Volume du camion	35	90	90	90	90	m³		-
Taux de retour à vide - Camion	85	85	85	85	85	%		-

3.4. Combustion du combustible en chaufferie

3.4.1. Synthèse des spécificités des scénarios considérés

Le tableau suivant présente les spécificités en termes de types de combustibles et type de chaufferie pris en compte dans la modélisation de la combustion en chaufferie.

Tableau 30 : Spécificités en termes de types de combustibles et types de chaufferie prises en compte dans la modélisation de la combustion en chaufferie

Quantité de combustible nécessaire pour produire 1 MWh de chaleur	Spécifique au combustible (humidité, PCI, densité…)
Émissions atmosphériques	Spécifique au type de chaufferie
Composition des cendres	Spécifique au type de chaufferie

3.4.2. Émissions de polluants atmosphériques (hors CO_2) liées à la combustion

Deux méthodes peuvent être considérées pour déterminer les émissions atmosphériques à défaut d'avoir des mesures réelles et spécifiques par type de combustible et type de chaufferie :

- Méthode 1 : Utilisation des valeurs limites d'émissions (VLE), c'est-à-dire les seuils réglementaires.
- Méthode 2 : Utilisation des facteurs d'émissions spécifiques (FE) [70], issus des rapports de contrôle réglementaires, sur le parc financé par le Fonds Chaleur de l'ADEME.

Méthode 1 : Utilisation des VLE

La production d'1 MWh d'énergie est conditionnée par le rendement de la chaufferie et le PCI du combustible (*in fine* de la quantité de combustible à brûler).

Les émissions lors de la combustion sont déterminées sur base des VLE et du volume de fumées spécifique.

*Émissions atmosphériques = Volume des fumées sèches à 6 % de O_2 * Valeurs limites d'émissions (VLE - à 6 % de O_2 sur gaz secs)*

Les émissions atmosphériques propres à chaque scénario sont reprises dans le tableau suivant.

[70] Facteurs déterminés à l'aide des rapports d'émissions des chaufferies biomasse soutenues par le Fonds Chaleur de l'ADEME et du CITEPA

Tableau 31 : Combustion en chaufferie – Émissions atmosphériques sur base des valeurs limites d'émissions (VLE) (source : ICPE) – Méthode 1

	Scénario	
	S1* – S2 – S3 – S4 – S6 – S7 – S8 – S9	S5
Poussières (mg/Nm³)	50	50[71]
NO_2 et NO (mg/Nm³)		400[73]
SO_2 (mg/Nm³)	225[72]	200[73]
NO_x (mg/Nm³)	525[74]	-
CO (mg/Nm³)	250	75
Dioxines / furanes (ng/Nm³)	0,1	0,15
COVNM (mg/Nm³)	50	-
Substances organiques (mg/Nm³)	-	15
Chlorure d'hydrogène (mg/Nm³)	-	15
Fluorure d'hydrogène (mg/Nm³)	-	1,5
Ammoniac (mg/Nm³)	-	40,91
Rubrique ICPE	2910	2971

**À noter que le scénario 1 (S1) n'est donc pas théoriquement concerné par les VLE puisque la chaudière est d'une puissance inférieure à 0,5 MW.*

ICPE 2910 : Combustion, à l'exclusion des installations visées par les rubriques 2770, 2771, 2971 ou 2931 (fait référence aux installations de combustion de la biomasse). Les VLE sont celles qui s'appliquent actuellement aux installations soumises à déclaration et mises en service entre le 1er janvier 2014 et le 20 décembre 2018, quelle que soit la puissance (supérieure à 1 MW toutefois). Arrêté du 3 août 2018.

ICPE 2971 : Installation de production de chaleur ou d'électricité à partir de déchets non dangereux préparés sous forme de combustibles solides de récupération dans une installation prévue à cet effet, associés ou non à un autre combustible. Les VLE sont celles qui s'appliquent actuellement aux installations soumises à autorisation. Arrêté du 23 mai 2016.

Méthode 2 : Utilisation des rapports d'émissions des chaufferies biomasse soutenues par le Fonds Chaleur de l'ADEME

Les émissions lors de la combustion à la chaufferie sont calculées à l'aide des facteurs d'émissions déterminés pour une quantité d'énergie produite.

Ces facteurs d'émissions utilisés sont issus :

- D'une collecte des rapports d'émissions de 110 chaufferies soutenues par le Fonds Chaleur de l'ADEME[75].
  Des facteurs d'émissions spécifiques à la gamme de puissance des chaufferies étudiées sont utilisés.
- Du CITEPA, lorsque les facteurs ne sont pas disponibles auprès de l'ADEME.
- De l'étude ACV FCBA 2012 pour les granulés (pour une chaudière de 50 kW).

Le tableau ci-dessous reprend les FE issus de ces différentes sources pour les différentes catégories de chaufferie et de combustibles lorsque pertinent.

[71] Valeurs pour des installations < 50 MWh_{th}
[72] Dans le cadre de biomasse d'origine forestière, l'utilisation de VLE est problématique car la biomasse forestière ne contient pas de soufre (ou de manière très marginale).
[73] Valeurs pour des installations < 300 MWh_{th}
[74] La nouvelle valeur limite mentionnée dans l'ICPE est de 300 mg/Nm³ pour les grandes chaufferies.
[75] La moitié des chaufferies sont implantées dans le collectif et l'autre moitié sur des sites industriels.

Tableau 32 : Combustion en chaufferie – Émissions (avant traitement éventuel des fumées) – Méthode 2

Polluant	Émission par type de chaufferie			
Scénarios	S1[76]	S2, S4, S9	S3, S7, S8	S6
Poussières (g/MWh$_{PCI}$)	360	60	53	80[77]
NO_x (g/MWh$_{PCI}$)	720	526	415 (pour S3,S8)	266
			526 (pour S7)	
SO_x (g/MWh$_{PCI}$)	36	34	17	9
CO (g/MWh$_{PCI}$)	134	134	134	234
Dioxines/furanes (ng/MWh$_{PCI}$)	144	144	144	112
COVNM (g/MWh$_{PCI}$)	17,3	5,8	8,6	5,4
Substances organiques (g/MWh$_{PCI}$)	-	-	-	-
HCl - Chlorure d'hydrogène (g/MWh$_{PCI}$)	-	-	-	-
HF - Fluorure d'hydrogène (g/MWh$_{PCI}$)	-	-	-	-

Légende

- FE issus des rapports d'émissions de 110 chaufferies soutenue par le Fonds Chaleur de l'ADEME.
- FE issus du CITEPA , données OMINEA 2018[78] (pour une chaudière bois dans le secteur commercial et institutionnel de puissance < 50 MW). Le CITEPA ne fournit pas d'information différenciée par puissance.
- FE issus d'une campagne de mesure menée par l'ADEME sur 9 installations, datant de 2016 : https://www.ademe.fr/evaluation-performances-energetiques-environnementales-chaufferies-biomasse
- Biomasse Normandie sur base de différentes ACV réalisées par le FCBA (2012) pour une chaudière de 50 kW, utilisant le base de données ecoinvent

Choix de la méthode retenue pour les différents scénarios

Le tableau suivant compare les deux méthodes décrites ci-dessous pouvant être utilisées pour déterminer les émissions atmosphériques.

- La première méthode (M1) est retenue pour le scénario 5 en l'absence d'autres sources de données disponibles.
- La seconde méthode (M2) est retenue pour :
  - le scénario 1 en l'absence de VLE réglementaires pour des petites chaufferies,
  - les autres scénarios (2,3,4,7,8,9) afin de coller plus à la réalité de terrain et ainsi retranscrire des performances réelles mesurées plutôt que des seuils (parfois fort élevés).

Tableau 33 : Comparaison des méthodes pour déterminer les émissions atmosphériques

Critère	Méthode 1	Méthode 2
Données	Majorantes (issues des VLE)	Mesurées (issues des rapports d'émissions)
Émissions	Spécifique au combustible (calculé sur base du volume de fumées produit)	Spécifique à l'installation (puissance).
	S5	S1,S2,S3,S4,S6,S7,S8,S9

Le tableau ci-dessous reprend les FE utilisés dans la modélisation.

Tableau 34 : Émissions utilisées dans la modélisation pour la combustion en chaufferie (avant traitement éventuel des fumées)

Polluant	Emission par type de chaufferie	Flux élémentaire[79]

[76] À noter que les chaufferies de petites puissances représentent une part relativement élevée en termes de nombre de chaufferies en fonctionnement (~ 90 %) mais relativement faible en termes de quantité de chaleur produite (~ 5 %).

[77] L'étude source mentionne comme facteur d'émission des particules $PM_{2,5}$ la valeur de 20 g/GJ. En posant l'hypothèse que les $PM_{2,5}$ représentent 90 % des PM émises, cela donne un facteur d'émission pour l'ensemble des particules (TSP) de 22,2 g/GJ soit 80 mg/MWhPCI. Il est à noter que cette valeur est relative à une chaudière de 50 kW soit une chaudière sans filtre à manches/électrofiltre. Il est posé pour hypothèse que les chaudières granulés du scénario 6 (entre 0 et 0,5 MW) n'ont pas de filtre à manches/électrofiltre et que le facteur d'émission de 80 mg/MWhPCI constitue donc une référence possible pour le scénario 6.

[78] Ces données sont basées sur des données des années 90. Elles ont été utilisées à défaut de mieux et sur base du constat qu'il n'y a pas eu d'avancées technologiques majeures. Des campagnes de mesure sont actuellement en cours dans le cadre du projet ACIBIOQA. Elles pourront être intégrées lors d'un prochain exercice.

[79] Selon la nomenclature ILCD

	0-0,5 MW	0,5 – 5 MW	5 – 50 MW	Granulés 0 - 0,5 MW	DEA	
Méthode	M 2				M 1	
Scénarios	S1	S2, S4, S9	S3, S7, S8	S6	S5	
Poussières (g/MWh_{PCI})	360	60	53	80	67	émissions de poussières [80] dans l'air : particles (PM10) , emissions to air, unspecified ; particles (PM2,5-10) , emissions to air, unspecified ; particles (PM2,5) , emissions to air, unspecified (kg) ;
NO_x (g/MWh_{PCI})	720	526	415 (S3, S8) 526 (S7)	266	537	émissions de NOx dans l'air : Nitrogen oxides, emissions to air, unspecified (kg)
SO_x (g/MWh_{PCI})	36	34	17	9	268	émissions de SOx dans l'air : sulfur oxides, emissions to air, unspecified (kg)
CO (g/MWh_{PCI})	134	134	134	234	100	émissions de CO dans l'air : carbon monoxide (biogenic) , emissions to air, unspecified (kg)
Dioxines/furanes (ng/MWh_{PCI})	144	144	144	112	201	émissions de dioxines dans l'air : 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin, emissions to air, unspecified (kg)
COVNM (g/MWh_{PCI})	17,3	5,8	8,6	5,4	-	émissions COVNM dans l'air : non-methane volatile organic compounds, emissions to air, unspecified (kg)
Substances organiques (g/MWh_{PCI})	-	-	-	-	20	émissions de COV dans l'air : volatile organic compound, emissions to air, unspecified (kg)
HCl - Chlorure d'hydrogène (g/MWh_{PCI})	-	-	-	-	20	émissions d'HCl dans l'air : hydrogen chloride, emissions to air, unspecified (kg)
HF - Fluorure d'hydrogène (g/MWh_{PCI})	-	-	-	-	2	émissions d'HF dans l'air : hydrogen fluoride, emissions to air, unspecified (kg)

Légende

FE déterminés à partir des VLE sur base d'un facteur de conversion de 1 mg/Nm³ = 1,343 g/MWh_{PCI}

Influence des équipements de traitement des fumées

Selon la puissance de la chaufferie et le type de combustible, les chaufferies disposent d'équipements de traitement des fumées plus ou moins complexes. Les équipements retrouvés sont repris dans le

[80] Les PM_{10} représentent 94 % en moyenne des rejets. Les rejets de $PM_{2.5}$ et PM_1 représentent respectivement 77 % et 50 % des poussières totales
Source : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/campagne_ademe_2016_chaufferie_biomasse_v2.pdf)
Valeur retenue : PM_{10} = 23 % - $PM_{2.5}$ = 27 % – $PM_{0.2}$ = 50 %.

Tableau 7.

Les petites chaufferies (< 0,5 MW) ne disposent en général pas de filtres à manches (FAM). En l'absence de filtres à manche, les cendres collectées habituellement par celui-ci (5 % des cendres totales) sont émises sous forme de poussières[80].

Certaines installations (généralement les grosses installations) sont équipées d'un système qui permet de réduire les émissions de NOx (DeNOx non catalytique de type « SNCR » à l'aide d'ammoniac ou d'urée). La présence d'une SNCR :

- permet d'abattre les émissions de NOx de 40 à 70 %[81] ;
- génère des émissions d'ammoniaque sous forme gazeuse (NH_3) en sortie d'installation de 10 mg/Nm³[80] (appelées « ammonia slip » dues à l'utilisation de l'ammoniaque en solution « NH_4OH » comme agent de neutralisation des NOx) ;
- génère dans certaines conditions des émissions de N_2O (plus conséquentes dans le cas d'un traitement à l'urée plutôt qu'à l'ammoniaque 27,8 micromoles/mole vs 0 à 7 micromoles/mole).

À noter que la mise en œuvre d'un SNCR nécessite un pilotage fin et ne peut être mis en œuvre sur des chaufferies à régime variable (telles que celles visant à alimenter un réseau de chaleur) sous peine de voir les émissions d'ammoniac augmenter considérablement.

Certaines installations (généralement celles brûlants des déchets de bois adjuvantés (S5)) sont équipées de systèmes qui permettent de réduire les émissions de gaz acides et les émissions de dioxines (Dediox).

3.4.3. Exploitation/Fonctionnement de la chaufferie

Caractéristiques pour le fonctionnement de la chaufferie

Tableau 35 : Fonctionnement de la chaufferie (source : Collecte auprès de différents professionnels du secteur et expertise de Biomasse Normandie)

		Réseau de chaleur			Industrie	Cogénération
		< 0,5 MW	0,5 à 5 MW	5 à 50 MW	5 à 50 MW	0.5 à 3 MWé
	Scénario	S1, S6	S2, S4	S7, S8	S3, S5	S9
Caractéristiques des chaufferies : exploitation						
Rendement global (%)	Combustibles	80[82]	85	85	85	75
	Combustible sous la forme de granulés	90	-	-	-	-
	Si cogénération : dont chaleur dont électricité	-	-	-	-	47,5 (chaleur) 20 (élec)
Consommation d'électricité (kWh/MWh sortie chaufferie)		15	24	24	24	24
Fonctionnement à équivalent pleine puissance (h/an)		1 500	2 300	3 000	6 500	7 000
Durée de vie moyenne de l'installation (génie civil) (an)		35	35	35	35	35
Durée de vie moyenne des équipements (an)		20	20	20	20	20

Le jeu de données d'inventaire utilisé pour les infrastructures de la chaufferie est : furnace, wood chips, with silo, 1000 kW, EI 3.5 (unit).

[81] Bicocchi, Les polluants et les techniques d'épuration des fumées – Cas des unités de traitement de valorisation des déchets, 2ème Edition Etat de l'art, RECORD, Editions Lavoisier, 2009

[82] Pour les chaudières < 0,5 MW, la proposition d'un rendement de 80 % intègre le rendement théorique à puissance nominale (qui peut effectivement être au moins égal à celui d'une chaudière de puissance supérieure) mais également le fait qu'elles sont souvent surdimensionnées (et fonctionnent donc sur une durée à équivalent pleine puissance plus faible que les chaudières de puissance plus élevées, généralement dimensionnées plus justement) et exploitées par un technicien qui n'est pas un professionnel de l'énergie.

Consommables

Tableau 36 : Consommables pour le fonctionnement de la chaufferie

Réactifs	Unité	Aucun traitement	Traitement des fumées (voie sèche)	SNCR	Dediox	Traitements des gaz acides	ICV	Source
Scénarios		S1	S2, S3, S4, S5, S7, S8, S9	S3, S5	S5			
Bicarbonate de sodium	kg/t de combustible entrant	-	1,08	0	0	0,56	ammonium bicarbonate production, RER, EI v3,5 (kg)	Source : outil WILCI
Chaux éteinte		-	0,04	0	0	0,02	lime production, hydrated, packed, CH, EI v3,5 (kg)	
Chaux à surface spécifique élevée		-	0,54	0	0	0,28	lime production, hydrated, packed, CH, EI v3,5 (kg)	
Ammoniac		-	0	0,52	0	0	market for ammonia, liquid, RER, EI v3,5 (kg)	
Urée		-	0	1,39	0	0	market for urea, as N, GLO, EI v3,5 (kg)	
Charbon actif		-	0,47	0,56	0,51	0	Carbon black production, GLO, EI v3,5 (kg)	
Coke de lignite		-	0,45	0,66	0,66	0	Market for coke[83], GLO, EI v3,5 (MJ)	
Autres produits chimiques		-	0,91	1,.44	2,12	0	Market for chemical, organic, GLO, EI v3.5 (kg)	

3.4.4. Cendres

La quantité de cendres produites par la combustion est décrite dans le tableau suivant en fonction du combustible[84]. Le taux de cendres correspond à la teneur en matières minérales contenues dans le combustible. Il correspond au ration entre masse de cendres produites/masse du combustible anhydre.

Tableau 37 : Quantité de cendres

Combustible		Plaquettes forestières		Produits connexes de scierie ou papeterie	Granulés	Broyats de bois en fin de vie	
		sèches	humides			Bois « propre »	Bois « adjuvanté »
Scénarios		S1	S2, S7 S8, S9	S3	S6	S4	S5
Taux de cendres	(%)	1,5	2,25	6	0,75	2	2
Dont sable/terre	(%)	0	0	1 à 5	0	0	0
Dont autres éléments minéraux	(%)	1,5	2,25	3	0,75	2	2

Les cendres sont classifiées en trois catégories et produites dans des proportions différentes :

- les cendres sous foyer (80 %) ;
- les cendres sous multi-cyclone (15 %) ;
- les cendres issues du filtre à manches (5 %).

Les cendres sous-foyer, ou un mélange de cendres sous-foyer et de cendres sous multi-cyclone, sont considérées en cas de base comme étant épandues et les cendres issues du filtre à manches comme étant enfouies en installation de stockage des déchets dangereux (ISDD)[85]. Il est considéré qu'une partie du carbone contenu dans les cendres se dégradent (5 %) en CO_2 et CH_4 (50 : 50) lors de l'enfouissement de celles-ci.

L'épandage des cendres prend en compte :

- les impacts de l'épandage ;
- les impacts évités liés à la non-utilisation de fertilisants synthétiques.

[83] 28,6 kg/MJ
[84] Il est considéré que l'essence n'a pas d'influence sur le taux de cendres.
[85] treatment of wood ash mixture, pure, sanitary landfill, Europe without Switzerland, EI v3.5 (kg)

En France, les cendres peuvent être épandues, sous certaines conditions, sur des sols agricoles et forestiers (depuis 2013). En pratique, les cendres sont principalement épandues sur les sols agricoles. En 2015, l'épandage des cendres en forêt ne concernaient que des chantiers de démonstration[86] et n'est dès lors qu'exceptionnellement autorisé. Dans cette étude, il est considéré que les cendres sont épandues sur un sol agricole et que le bénéfice lié à l'épandage des cendres *(ou impacts évités liés à la non-utilisation de fertilisants synthétiques*) est considéré en fonction de la teneur des éléments nutritifs et de la biodisponibilité des éléments dans les cendres et n'est pas fonction du type de culture.

Caractéristiques des cendres

Les caractéristiques chimiques des cendres sont issues de l'étude de caractérisation des cendres menée par l'ADEME et sont présentées dans le tableau ci-dessous. La composition des cendres est caractéristique d'une puissance d'une installation et n'est donc pas différenciée dans le cadre de cette étude par type de combustible[87]. La composition des cendres ci-dessous est calculée sur base de la composition des cendres données en Annexe 6 et de la quantité de cendres collectée par les différents équipements (cf. ci-dessus).

Tableau 38 : Composition des cendres sous foyer et multi-cycloniques en mélange

Polluant	Composition par gamme de puissance des chaufferies			Source	Émissions dans le sol	Impacts évités[88]
	0 à 0,5 MW	0,5 à 5 MW	5 à 50 MW			
	S1, S6	S2, S4, S9	S3, S5, S7, S8			
CaO (kg/$t_{cendres}$)	485,5	494,37	356,02	Biomasse Normandie et ADEME	Émissions de calcium dans un sol agricole : calcium, Emissions to agricultural soil	lime production, milled, loose, Europe without Switzerland , EI v3,5 (kg)[89]
MgO (kg/$t_{cendres}$)	44,3	29,25	31,39		Émissions de magnésium dans un sol agricole: Magnesium, Emissions to agricultural soil	Dolomite production, RER, EI V3,5 (kg)
P2O5 (kg/$t_{cendres}$)	23,51	20,93	21,41		Émissions de phosphore dans un sol agricole** : Phosphorus, Emissions to agricultural soil	market for phosphate fertiliser, as P2O5, GLO, EI v3,5 (kg)
K2O (kg/$t_{cendres}$)	92,56	53,53	50,57		Émissions de potassium dans un sol agricole: potassium, Emissions to agricultural soil	market for potassium fertiliser, as K2O, GLO, EI v3,5 (kg)
S (g/$t_{cendres}$)	5 895,23	3 586,87	2 932,40		Émissions de soufre dans un sol agricole: sulphur, Emissions to agricultural soil	-
As (g/$t_{cendres}$)	8,62	5,09	8,10		Émissions d'arsenic dans un sol agricole: arsenic, Emissions to agricultural soil	-
Cr (g/$t_{cendres}$)	55,93	95,53	104,83		Émissions de chrome dans un sol agricole: chromium, Emissions to agricultural soil	-
Se (g/$t_{cendres}$)	4,65	4,98	4,83		Émissions de sélénium dans un sol agricole: selenium, Emissions to agricultural soil	-
Mo (g/$t_{cendres}$)	2,43	2,28	4,08		Émissions de molybdène dans un sol agricole: molybdenum, Emissions to agricultural soil	-
Na2O (g/$kg_{cendres}$)	3,21	3,05	5,26		Émissions d'oxyde de sodium dans un sol agricole	-
Ni (g/$t_{cendres}$)	29,43	25,56	23,83		Émissions de nickel dans un sol agricole: nickel, Emissions to agricultural soil	-
Cu (g/$t_{cendres}$)	123,44	135,15	158,32		Émissions de cuivre dans un sol agricole: copper, Emissions to agricultural soil	-
Zn (g/$t_{cendres}$)	276,36	224,79	334,56		Émissions de zinc dans un sol agricole : zinc, Emissions to agricultural soil	-
Cd (g/$t_{cendres}$)	3,84	3,77	4,38		Émissions de cadmium dans un sol agricole : cadmium, Emissions to agricultural soil	-
Pb (g/$t_{cendres}$)	42,96	30,23	45,94		Émissions de plomb dans un sol agricole : lead, Emissions to agricultural soil	-

[86] Record, 2016, Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse
[87] Bien que les granulés et les DEA ne soient pas des combustibles couverts par l'étude ADEME, la composition des cendres mentionnée dans l'étude leur est quand même attribuée (en fonction de la puissance de la chaufferie concernée), faute de données correspondant à ces combustibles.
[88] ADEME, 2005, Gestion et valorisation des cendres de chaufferies bois
[89] Application sur des sols naturellement acides uniquement

Polluant	Composition par gamme de puissance des chaufferies			Source	Émissions dans le sol	Impacts évités[88]
	0 à 0,5 MW	0,5 à 5 MW	5 à 50 MW			
	S1, S6	S2, S4, S9	S3, S5, S7, S8			
Hg (g/$t_{cendres}$)	0,1	0,1	0,11		Émissions de mercure dans un sol agricole: mercury, Emissions to agricultural soil	-
Benzo(a)pyrène (mg/$kg_{cendres}$)	0,49	0,07	0,05		Émissions de Benzo(a)pyrène dans un sol agricole: benzo[a]fluoranthene, Emissions to agricultural soil	-
Benzo(b)fluoranthène (mg/$kg_{cendres}$)	0,97	0,09	0,05		Émissions de Benzo(b)fluoranthène dans un sol agricole: benzo[b]fluoranthene, Emissions to agricultural soil	-
Fluoranthène (mg/$kg_{cendres}$)	0,38	0,06	0,05		Émissions de Fluoranthène dans un sol agricole: fluoranthene, Emissions to agricultural soil	-
PCB (mg/$kg_{cendres}$)	0,01	0,01	0,01		Émissions de PCB dans un sol agricole: polychlorinated biphenyls, Emissions to agricultural soil	-
Dioxines (ng/$kg_{cendres}$)[90]	85,16	72,74	87,08		Émissions de dioxines dans un sol agricole : 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	-

** Prise en compte du phénomène de ruissellement (inclus dans le facteur de caractérisation[91])

Le contenu carbone des cendres est relativement faible. Il est fixé entre 5 et 12 %.

La modélisation des impacts des impacts évités de l'épandage tient compte de la biodisponibilité des éléments (cf. ci-dessous). Les principaux éléments disponibles dans les cendres sont le CaO et le K_2O.

Tableau 39 : Biodisponibilité des éléments dans les cendres

Éléments	Biodisponibilité [92]	Intérêt agronomique
N	-	Éléments nutritifs
P	7 %	
K	49 %	
Mg	26 %	Éléments nutritifs Rectification du pH du
Ca	35 %	Structuration du sol Rectification du pH du sol

Certaines études montrent que *le potassium contenu dans les cendres peut avoir un effet positif sur les sols acides mais peut être sans effet sur les sols alcalins. De la même manière, sur les sols acides, aucun effet significatif des procédés n'est observé sur les teneurs en macro-éléments (phosphore et magnésium), alors que sur sol alcalin, les teneurs en phosphore, magnésium et calcium diminuent significativement avec l'apport de cendres*[93].

Par ailleurs, « *les teneurs en macroéléments, microéléments et éléments traces métalliques (ETM) sont fortement dépendantes du combustible utilisé pour produire les cendres (bois 100 % naturel vs. bois en partie recyclé). Les cendres de bois 100 % naturel présentent des teneurs en macroéléments particulièrement intéressantes, et contiennent des ETM mais sous une forme peu ou pas disponible. Ces cendres ne semblent donc pas présenter de risques pour les sols et les cultures et pourraient être utilisées comme engrais potassique sur les sols acides.*

Les cendres issues de bois recyclé présentent des teneurs en macroéléments totaux plus faibles. Les teneurs en ETM sont, par contre, beaucoup plus importantes et empêchent leur utilisation en agriculture. Il serait intéressant de poursuivre les recherches en analysant les effets de ces cendres sur des sols neutres ou légèrement alcalins ainsi qu'au champ »[94].

[90] Les dioxines présentes dans les cendres sont diverses. Il a été décidé de les modéliser sous la forme d'une seule "molécule".
[91] Zampori, L. and Pant, R., Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76- 00654-1, doi:10.2760/424613, JRC115959
[92] Source : Sinaj, 2014, Les cendres de bois : un nouvel engrais pour l'agriculture Suisse, Figure 4
[93] Hedi Kebli, Alexandra Maltas et Sokrat Sinaj, 2017, Potentiel agronomique des cendres issues de bois recyclé
[94] S. Sinaj and al. 2015, la valorisation des cendres en agriculture : l'expérience Suisse

4. Données et hypothèses pour les variantes

4.1. Variabilité des systèmes rencontrés

4.1.1. Variantes du scénario 1 – Plaquette forestière sèche

		S1	Variante S1
		Plaquettes sèches	
Source et production de biomasse		Taillis de feuillus (châtaigner)	
Type de produit récolté		BI/BE + 70%MB_{pl}[95]	
Broyage en bord de route		X	
Transport du bord de route vers plateforme de préparation des plaquettes		X	X
Préparation	Broyage		X
	Séchage	Naturel	Forcé
	Concassage		
	Broyage rapide		
	Criblage	X	X

Mise en œuvre d'un séchage forcé en lieu et place d'un séchage naturel

Lors de la préparation de plaquettes forestières sèches, le séchage naturel est remplacé par un séchage forcé. Le séchage forcé se différencie du séchage naturel par une consommation d'énergie additionnelle.

Tableau 40 : Données et hypothèses relatives au séchage forcé

	Valeur		Unité	Source	ICV
	Cas de base	Variante			
Taux d'humidité initial	45		%	Biomasse Normandie	-
Taux d'humidité final	25		%	Biomasse Normandie	-
Perte de matière anhydre (dégradation par les micro-organismes)	13	0	% de la masse de matière anhydre des plaquettes avant séchage	Biomasse Normandie	Émissions de CO_2b : carbon dioxide (biogenic), emissions to air, unspecified
Dégradation - Émissions de COV	0,2	0	g de COV/kg de matière anhydre[96]	[97] [98]	émissions de COV dans l'air : volatile organic compound, emissions to air, unspecified
Perte réelle d'eau	290,5	267	kg / t de combustible avant séchage	Biomasse Normandie	Water, Emissions to air, unspecified (m^3)
Chaleur	0	1,35	kWh/l d'eau évaporée	Biomasse Normandie	
	0	360	kWh/t de combustible avant séchage		
	-	1/3 biomasse	-	[99]	Heat production, softwood chips from forest, at furnace 1000kW, EI 3.5 (MJ)
		2/3 gaz naturel			Heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW, EI 3.5 (MJ)

Broyage de rondins sur plateforme en lieu et place d'arbres entiers en bordure de forêt

[95] Gestion de la multifonctionnalité : Affectation volumique
[96] 0 % d'humidité
[97] Wu et Milota 1999, Effect of temperature and humidity on total hydrocarbon emission from Douglas-fir lumber
[98] MARCOTTE LATULIPPE A., 2006, Caractérisation des composés organiques volatils émis lors du séchage de bois
[99] James B. Wilson, Life Cycle Inventory of particleboard in terms of resources, emissions, energy and carbon, Oregon State University, April 2009

Cette section décrit les données utilisées lorsqu'un broyage sur plateforme est considéré dans la préparation du combustible en lieu et place d'un broyage en bord de route.

Tableau 41 : Données et hypothèses relatives au broyage sur plateforme de rondins et au séchage naturel qui s'en suit

BROYAGE	Valeur		Unité	Source	ICV
	Cas de base	Variante			
Type de biomasse	Taillis de feuillus (châtaigner)				
Type de produit récolté	BI/BE + 70%MB_{pl}				
Type de biomasse mise en œuvre	Arbre entier	Rondins	-		
Broyage Consommation de gasoil du broyeur	52,5	60	l/h	Biomasse Normandie	market for diesel, low-sulfur, Europe without Switzerland, EI v3.5 (kg)
Broyage Consommation de gasoil du chargeur	0	5	l/h		market for diesel, low-sulfur, Europe without Switzerland, EI v3.5 (kg)
Broyage– Débit	112,5	150	map/h		-
Masse volumique	cf. Tableau 20		t/map		-
Transport du broyeur	40	30	km		
Production, maintenance, utilisation du broyeur	-		h		wood chipping, mobile chipper, at forest road, RER, EI V3.5 (hour)
Taux de pertes de biomasse lors du broyage	0		Masse de broyats/masse de bois rond prélevée	Biomasse Normandie d'après Biomasse Normandie et CNPF	-
SECHAGE NATUREL	Valeur		Unité	Source	ICV
	Cas de base	Variante			
Taux d'humidité initial	45		%	Biomasse Normandie	-
Taux d'humidité final	25	35	%	Biomasse Normandie	-
Perte de matière anhydre (dégradation par les micro-organismes)	13	0	% de la masse de matière anhydre des plaquettes avant séchage	Biomasse Normandie	Émissions de CO_2b : carbon dioxide (biogenic), emissions to air, unspecified
Perte réelle d'eau	290,5	154	kg / t de combustible avant séchage	Biomasse Normandie	Water, Emissions to air, unspecified (m^3)
Dégradation - Émissions de COV	0,2	0	g de COV/kg de matière anhydre[100]	[101] [102]	émissions de COV dans l'air : volatile organic compound, emissions to air, unspecified

[100] 0 % d'humidité
[101] Wu et Milota 1999, Effect of temperature and humidity on total hydrocarbon emission from Douglas-fir lumber
[102] MARCOTTE LATULIPPE A., 2006, Caractérisation des composés organiques volatils émis lors du séchage de bois

4.1.2. Variantes du scénario 2 – Plaquette forestière humide

		S2	Variantes S2
		Plaquettes humides	Plaquettes humides
Biomasse		Taillis de feuillus (châtaigner)	
Préparation	Broyage en bord de route	X	
	Transport du bord de route vers plateforme de préparation des plaquettes		
	Séchage naturel		
	Concassage		
	Broyage rapide		
	Criblage		
Transport vers la chaufferie		Standard	Accrue
Chaufferie – Traitement des fumées	Dépoussiérage	MC + EF/FAM	
	SNCR	Non	Oui
Mode de fonctionnement de la chaufferie		Normal	Émissions supérieures à la réglementation
			Émissions conformes à la nouvelle réglementation
			Mise en place d'une unité de condensation

Présence d'un système de traitement des fumées « SNCR »

Afin de répondre aux exigences réglementaires (liées aux limites d'émissions), certaines installations existantes s'équipent de système de traitement des fumées tel que la SNCR. Cette technologie permet notamment de réduire les émissions de NOx (cf. 3.4.3 Exploitation/Fonctionnement de la chaufferie). Il convient de préciser que cette technologie présente comme effet d'émettre de l'ammoniac à la cheminée (émissions accrues si l'installation SNCR est mal réalisée ou en cas de variabilité des conditions de combustion (variabilité du combustible, variabilité du taux de charge…).

Tableau 42 : Présence d'un système de traitement des fumées « SNCR » urée/ammoniac

	Sans SNCR	Avec SNCR	Flux élémentaire[103]
	Cas de base	Variante	
NOx (mg/Nm³)	525[104]	157,5 – 315 (40-70 % d'abattement)	émissions de NOx dans l'air : Nitrogen oxides, emissions to air, unspecified (kg)
Consommables SNCR	-	Tableau 36	
NH_3[105]	0 g/MWh_{PCI}	6,8 g/MWh_{PCI} (1,3 – 26 g/MWh_{PCI})	émissions de NH_3 dans l'air : Ammoniac, emissions to air, unspecified (kg)
N_2O	0	0,06 mg/MWh_{PCi}	Emissions de N_2O dans l'air : Nitrous oxide, emissions to air, unspecified (kg)

Émissions supérieures à la réglementation (exercice théorique)

Lors du démarrage des chaufferies, d'un sous-dimensionnement des installations (régime de fonctionnement éloigné du plein régime) ou de l'approvisionnement en combustibles de sources diverses (exemple y compris des DEA ou trop humide), la combustion peut entrainer des émissions supérieures à la réglementation.

Sur base des dépassements observés dans les rapports d'émissions des chaufferies financées par le Fonds Chaleur[106], les facteurs d'émissions ont été multipliés par 2 et 5 afin d'évaluer l'influence sur le bilan environnemental d'une chaufferie d'émissions atmosphériques non conformes à la réglementation.

Les dépassements des émissions permises par la réglementation identifiés dans la synthèse publique de l'étude « ADEME, IRH Ingénieur Conseil. 2018. Chaufferies biomasse et émissions atmosphériques » sont les suivants :

- 6 % des rapports d'émissions sont non-conformes à la réglementation sur les poussières.
- 4 % des rapports d'émissions sont non-conformes à la réglementation sur le SO_2.

[103] Selon la nomenclature ILCD
[104] Il est considéré que les facteurs d'émission utilisés sont issus de chaufferies ne présentant pas de système SNCR
[105] Biomasse Normandie d'après données constructeurs
[106] https://www.ademe.fr/chaufferies-biomasse-emissions-atmospheriques

- 1 % des rapports d'émissions sont non-conformes à la réglementation sur les NO_x.
- 18 % des rapports d'émissions sont non-conformes à la réglementation sur le CO.
- 2 % des rapports d'émissions sont non-conformes à la réglementation sur les COVNM.

Ce facteur est appliqué pour l'ensemble des émissions de manière indifférenciée. *Il s'agit d'un exercice théorique.*

Tableau 43 : Émissions atmosphériques supérieures à la réglementation (exercice théorique)

	VLE Rubrique ICPE 2910[107]	Scénario ref.	Scénario *2	Scénario *5 – CO cst	Scénario *5 – NOx cst	Flux élémentaire
		Scénario de base – S2	***Variantes***			
Poussières (g/MWh_{PCI})	67	60	120	300		Cf. Tableau 34
SO_x (g/MWh_{PCI})[108]	302[109]	34	68	170		
NO_x (g/MWh_{PCI})	705	526	1052	2630	526	
CO (g/MWh_{PCI})	335	134	267	134	668	
Dioxines/furanes (ng/MWh_{PCI})	134	144	288	720		
COVNM (g/MWh_{PCI})	67	5,8	10,8	29		

	FE issus des rapports d'émissions de 110 chaufferies soutenue par le Fonds Chaleur de l'ADEME.
	FE issus du CITEPA, données OMINEA 2018 (pour une chaudière bois dans le secteur commercial et institutionnel de puissance < 50 MW). Le CITEPA ne fournit pas d'information différenciée par puissance.
	FE issus d'une campagne de mesure menée par l'ADEME sur 9 installations, datant de 2016 : https://www.ademe.fr/evaluation-performances-energetiques-environnementales-chaufferies-biomasse
	Les valeurs sont exprimées en g (ou ng) par MWh_{PCI}. La conversion entre les unités présentées dans le Tableau 31 et celle de ce tableau se base sur les travaux du groupe de travail ADEME – CITEPA – CIBE autour de l'évolution de certains facteurs d'émission de la combustion du bois dans les installations de combustion < 20 MW" (août 2018). Le facteur de conversion vaut : 1 mg/Nm^3 = 1,343 g/MWh_{PCI}

Émissions conformes à la nouvelle réglementation

Les valeurs issues des rapports d'émissions des chaufferies financées par le Fonds Chaleur[110] se rapportent principalement à des installations mises en service avant décembre 2018. C'est pourquoi, il a semblé opportun de définir une variante prenant en compte la nouvelle réglementation. Les valeurs pour la variante se réfèrent aux VLE applicables aux installations de 5 à 20 MW soumises à déclaration et mises en service après le 20 décembre 2018. Il est à noter qu'on considère que la chaufferie étudiée dans le scénario 2 d'une puissance de 0,5 à 5 MW est incluse dans la catégorie « installation de puissance 5-20 MW » à défaut d'autres données.

Cette variante repose, par exemple pour les émissions d'oxydes d'azote, sur la conception différente des foyers de combustion avec la mise en œuvre de systèmes de réduction à la source tels que des foyers dimensionnés bas NO_x (chambre de combustion additionnelle par rapport à un foyer de combustion standard).

Cette variante repose, par exemple pour les émissions de poussières, sur une optimisation et une adéquation de la conception des systèmes d'électrofiltre (EF ou ESP) et de filtre à manche (FAM) (emplacement, configuration, type, etc.). En effet, ces deux systèmes de filtration permettent d'atteindre les VLE. Les solutions dites « émergentes » restent des dérivés de ces systèmes. L'élément clé réside plutôt dans la qualité de l'exploitation des systèmes et des mesures en continue nécessaires pour confirmer la bonne utilisation de ces filtres.

Tableau 44 : Émissions atmosphériques de la chaufferie suivant la nouvelle réglementation (exercice théorique)

	VLE (avant déc. 18)	VLE (après déc. 18)	Scénario ref. – Sc 2	Variante	Flux élémentaire
Poussières (g/MWh_{PCI})	67	40.3	60	40,3	Cf. Tab.

[107] Les données sont issues du Tableau 31 auxquelles sont appliquées le facteur suivant : (Volume des fumées /(PCI_{comb} *$rendement_{chaud}$)

[108] Le fonctionnement dégradé pour les émissions de SO_x représente les installations utilisant des mauvais combustibles (mix avec des plaquettes d'une autre origine que celles issues directement de bois forestier).

[109] Dans le cadre de biomasse d'origine forestière, l'utilisation de VLE est problématique car la biomasse forestière ne contient pas de soufre (ou de manière très marginale).

[110] https://www.ademe.fr/chaufferies-biomasse-emissions-atmospheriques

SO_x (g/MWh_{PCI})	302		34		
NO_x (g/MWh_{PCI})	705	403	526	403	
CO (g/MWh_{PCI})	335		134		
Dioxines/furanes (ng/MWh_{PCI})	134		144		
COVNM (g/MWh_{PCI})	67		5,8		

	FE issus des rapports d'émissions de 110 chaufferies soutenue par le Fonds Chaleur de l'ADEME
	FE issus du CITEPA, données OMINEA 2018 (pour une chaudière bois dans le secteur commercial et institutionnel de puissance < 50 MW). Le CITEPA ne fournit pas d'information différenciée par puissance.
	FE issus d'une campagne de mesure menée par l'ADEME sur 9 installations, datant de 2016 : https://www.ademe.fr/evaluation-performances-energetiques-environnementales-chaufferies-biomasse
	ICPE 2910 : Combustion, à l'exclusion des installations visées par les rubriques 2770, 2771, 2971 ou 2931 (fait référence aux installations de combustion de la biomasse). Les VLE sont celles qui s'appliquent actuellement aux installations soumises à déclaration et mises en service entre le 1er janvier 2014 et le 20 décembre 2018, quelle que soit la puissance (supérieure à 1 MW toutefois). Arrêté du 3 août 2018
	ICPE 2910. Les VLE sont celles qui s'appliquent aux installations de 5 à 20 MW soumises à déclaration et mises en service après le 20 décembre 2018

Les valeurs sont exprimées en g (ou ng) par MWh_{PCI}. La conversion se base sur les travaux du groupe de travail ADEME – CITEPA – CIBE autour de l'évolution de certains facteurs d'émission de la combustion du bois dans les installations de combustion < 20 MW" (août 2018). Le facteur de conversion vaut : 1 mg/Nm³ = 1,343 g/MWh_{PCI}

Mise en place d'une unité de condensation

Tout processus de combustion aboutit à la production de vapeur d'eau dans des proportions qui fluctuent en fonction de la teneur en hydrogène et en eau du combustible. Contrairement aux chaufferies biomasse, les chaufferies à combustibles fossiles sont désormais quasi systématiquement équipées d'une unité de condensation.

La mise en place d'une unité de condensation permet une amélioration significative du rendement thermique d'une chaufferie biomasse et permet ainsi de réduire les quantités de bois consommées pour la même énergie délivrée. La valeur d'augmentation de rendement considérée est de 10 %.

Il convient cependant de préciser que pour condenser les fumées de combustion du bois, la température de la « source froide » doit être comprise entre 47 °C et 63 °C selon l'humidité du bois et le niveau de maîtrise de la combustion. L'enjeu de la mise en place d'une unité de condensation résulte donc en la disponibilité de cette « source froide ». Cette source froide peut être disponible dans le cas de système de chauffage collectif pour des logements équipés de planchers chauffants.

La dépollution des gaz de combustion est une fonction secondaire du condenseur ; elle résulte de la captation de poussières lors du changement d'état de la vapeur d'eau. Cette captation n'est pas systématiquement quantifiée et est fonction de la technologie de condensation mise en œuvre (par exemple par voie humide). Aucun abattement n'est considéré dans cette variante.

Il est considéré que le condensat ne doit pas être neutralisé et qu'il est rejeté dans le réseau d'égouttage.

Tableau 45 : Mise en place d'une unité de condensation

	Référence	Variante	
Caractéristiques des chaufferies : exploitation			
Rendement global (%)	85	95	Tableau 35 + expertise ADEME – Biomasse Normandie
Consommation d'électricité (kWh/MWh sortie chaufferie)	24		Tableau 35
Fonctionnement à équivalent pleine puissance (h/an)	2 300		
Durée de vie moyenne de l'installation (génie civil) (an)	35		
Durée de vie moyenne des équipements (an)	20		
Émissions dans l'air			
Poussières (g/MWh_{PCI})	60		
Émissions dans l'eau			
Sulfite (mg/MJ_{in})	0	0,05	Approximation par les émissions dans l'eau d'une chaudière à condensation au gaz – Source EI
Sulfate (mg/MJ_{in})	0	0,05	
Nitrate (mg/MJ_{in})	0	0,13	
Nitrite (mg/MJ_{in})	0	0,003	

Distance de transport accrue vers la chaufferie

L'approvisionnement en plaquettes peut parfois avoir lieu moins localement (source de biomasse plus éloignée de la chaufferie). Dans ce cas de figure, une distance de transport accrue doit être parcourue pour approvisionner la chaufferie en combustible.

Tableau 46 : Distance de transport accrue parcourue pour approvisionner la chaufferie en combustible

	Référence	Variante	
Distance - Camion	35	200	500
Charge utile – Camion	27		
Volume du camion	90		
Taux de retour à vide - Camion	85		

Origine de la biomasse pour la fabrication des plaquettes forestières

Dans la présente section, les variantes se différencient entre elles via les éléments présentés dans le tableau ci-dessous. Les données sont issues d'inventaires pour la gestion et l'exploitation forestière fournis par le FCBA.

La variante A est le cas de base pour les scénarios S1-S7-S8-S9. Sur base d'une enquête réalisée, dans le cadre du projet GERBOISE, auprès des professionnels mobilisateurs de bois énergie en France sur les bois récoltés en 2015, il apparait que sur les 1,5 millions de tonnes de bois énergie couvertes par l'enquête, la répartition entre les différentes essences est de 71 % de feuillus, 27 % de résineux et 2 % d'indéterminés. Parmi la récolte du bois énergie issu de feuillus, 61 % de la récolte provient de coupe de taillis ou de taillis sous futaie.

Tableau 47 : Différences prises en compte dans l'étude suivant l'origine de la biomasse et le type de produits récoltés – Gestion de la multifonctionnalité

		Scenario de base	Variante B	Variante C	Variante D	Variante E		Variante F	Variante G	Variante H
Gestion sylvicole	Sylviculture/ Essence	Taillis de feuillus (châtaigner)	Futaie de résineux (douglas)	Futaie de résineux (douglas)	Futaie de résineux (douglas)	Taillis de feuillus (châtaigner)		Futaie feuillus (chêne et hêtre)	Futaie feuillus (chêne et hêtre)	Déprise agricole
		Mise en exploitation	Exploitation	Récolte des menus bois*	Récolte des souches*	Transformation en Futaie de résineux (douglas)		Exploitation	Récolte des menus bois*	Transformation en taillis courte rotation (eucalyptus)
	Produits récoltés	BI/BE+70%MB	BO BI/BE	100%MB	Souches	Taillis + 1ere rotation BI/BE+70%MB	BO BI/BE	BO BI/BE	100 % MB	BE + 100%MB
	Gestion de la multifonctionnalité	/	Affectation volumique entre BO et BI/BE	Les MB sont considérés comme des déchets dont seul le ramassage est inclus	Les souches sont considérées comme des déchets dont seul le ramassage est inclus	/	Affectation volumique entre BO et BI/BE	Affectation volumique entre BO et BI/BE	Les MB sont considérés comme des déchets dont seul le ramassage est inclus	/
	Produits couverts par inventaire	BI/BE+70%MB	BI/BE	100%MB	Souches	BI/BE+70%MB	BI/BE	BI/BE	100% MB	BE+100%MB

Légende :

Souche : Partie de l'arbre située au-dessous du trait de coupe, à savoir l'ensemble des racines et la partie du tronc qui reste attachée aux racines lors de l'abattage.
Bois d'œuvre (BO) : Ce compartiment est défini comme l'ensemble de la biomasse comprise dans la bille de pied et les surbilles de tige, jusqu'à la découpe commerciale bois d'œuvre, et qui peut avoir un usage potentiel bois d'œuvre.
Bois d'industrie et bois énergie (BIBE) : Ce compartiment est défini comme la somme de trois composantes :

(1) la biomasse de la tige comprise entre la découpe commerciale bois d'œuvre et la découpe bois fort (7 cm),
(2) la biomasse de la tige de dimension bois d'œuvre mais dont l'usage potentiel ne peut être le bois d'œuvre en raison de limites sur la qualité du bois,
(3) la biomasse comprise dans les branches jusqu'à la découpe bois fort (7 cm).

Menu bois (MB) : Ce compartiment est défini comme l'ensemble de la biomasse de la tige et des branches comprise dans les bois de diamètre inférieur à 7 cm.
TCR : Taillis courte rotation : Il s'agit d'espèces qui rejettent de souche telles que le peuplier, le saule, le robinier ou l'eucalyptus qui sont exploitées avec des rotations de 2 à 4 ans pour les TTCR et 5 à 10 ans pour les TCR.
Taillis : Terme désignant un peuplement forestier caractérisé par des rejets dont la régénération s'obtient par des coupes de rajeunissement.
Futaie : Peuplement forestier composé d'arbres issus de régénération naturelle ou artificielle destinés à atteindre un plein développement avant d'être récoltés

*Les menus bois et souches représentent actuellement une partie extrêmement faible des approvisionnements. Le potentiel de récolte additionnelle de ces compartiments n'est cependant pas négligeable.

Tableau 48 : Différences prises en compte dans l'étude suivant l'origine de la biomasse et le type de produits récoltés – Étapes considérées dans la gestion sylvicoles et types de gestion réalisée

			Variante A	Variante B	Variante C	Variante D	Variante E		Variante F	Variante G	Variante H
Gestion sylvicole	Sylviculture/Essence		Taillis de feuillus (châtaigner)	Futaie de résineux (douglas)	Futaie de résineux (douglas)	Futaie de résineux (douglas)	Taillis de feuillus (châtaigner)		Futaie feuillus (chêne et hêtre)	Futaie feuillus (chêne et hêtre)	Déprise agricole
			Mise en exploitation	Exploitation	Récolte des menus bois*	Récolte des souches*	Transformation en Futaie de résineux (douglas)		Exploitation	Récolte des menus bois*	Transformation en taillis courte rotation (eucalyptus)
	Produits récoltés		197 m³ BI/BE 29 m³ MB par ha – 20 ans	787 m³ BO, 180 m³ BI/BE et 203 m³ MB par ha – 53 ans	290 m³ MB par ha - 53 ans	188 m³ de S par ha – 53 ans	197 m³ BI/BE 29 m³ MB par ha – 20 ans	787 m³ BO, 180 m³ BI/BE et 203 m³ MB par ha – 53 ans	838 m³ BO 557 m³ BI/BE 542 m³ MB par ha – 170 ans	290 m³ par ha - 170 ans	785 m³ BE + MB par ha – 10 ans
	Produits récoltés couverts par l'inventaire		BI/BE+70%MB	BI/BE	100%MB	Souches	Taillis + 1ere rotation BI/BE+70%MB	BI/BE	BI/BE	100% MB	BE + 100%MB
	Etapes	Mise à disposition des plants et transport		x			x				x
		Plantation		x			x				x
		Fertilisation									x
		Éclaircie		x			x				x
		Exploitation	x	x			x	x	x		x
		Démembrement du houppier et évacuation	x	x			x	x	x		
		Débardage/ramassage	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Devenir des souches		Arasage et destruction des souches	Arasage	Arrachage, mise en andain	Arasage et destruction des souches	Arasage des souches			Arasage et destruction des souches

Légende :

Mise en andains : Etablissement de cordons constitués de tous les restes de coupe (branches, feuillages, souches éventuelles, etc.), que l'on aligne tous les 10 à 50 m sur 1 à plusieurs mètres de hauteur (au bull ou à la pelle mécanique), pour nettoyer le terrain et préparer ainsi la replantation.
Eclaircie : Réduction de la densité d'un peuplement non arrivé à maturité en vue d'améliorer la croissance et la forme des arbres restants.
Débardage : Transport de bois en forêt (en général jusqu'au bord de route).

*Les menus bois et souches représentent actuellement une partie extrêmement faible des approvisionnements. Le potentiel de récolte additionnelle de ces compartiments n'est cependant pas négligeable.

		Case de base	Variante B	Variante C	Variante D	Variante E		Variante F	Variante G	Variante H
Informations additionnelles	Taux de mécanisation	30 %	93 %	/	/	/	/	4 %	/	100 %
	Débardage[111]	100 % porteur	16 % skidder 84 % porteur	100 % porteur	100 % porteur	100 % porteur	16 % skidder 84 % porteur	64 % skidder 36 % porteur	/	96 % porteur 4 % skidder
	Fertilisation	/	/	/	/	/	/	/	/	Pour rotation 30 ans 191 kg N/ha, 301 kg K_2O/ha 234 kg P_2O_5 /ha

Tableau 49 : Différences prises en compte dans l'étude suivant l'origine de la biomasse et le type de produits récoltés – Données relatives au transport à partir de la forêt et aux propriétés du combustible issu de la biomasse forestière étudiée

		Case de base	Variante B	Variante C	Variante D	Variante E		Variante F	Variante G	Variante H
Gestion sylvicole	Sylviculture/Essence	Taillis de feuillus (châtaigner)	Futaie de résineux (douglas)	Futaie de résineux (douglas)	Futaie de résineux (douglas)	Taillis de feuillus (châtaigner)		Futaie feuillus (chêne et hêtre)	Futaie feuillus (chêne et hêtre)	Déprise agricole
		Mise en exploitation	Exploitation	Récolte des menus bois*	Récolte des souches*	Transformation en Futaie de résineux (douglas)		Exploitation	Récolte des menus bois*	Transformation en taillis courte rotation (eucalyptus)
Transport vers la chaufferie	Quantité transportée (t)	27	27	27	19.15	27	27	27	27	27
	Distance (km)	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Fonctionnement de la chaufferie	Masse volumique apparente (t/map)	0,33	0,23	0,23	0,23	0,33	0,23	0,33	0,33	0,375
	Taux d'humidité initial (% sur masse brute)	40	35	35	35	40	35	40	40	45
	Taux d'humidité finale (% sur masse brute)	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	Pertes d'eau lors du séchage (kg d'eau/t de combustible avant séchage)	201	134	134	134	201	134	201	201	268
	Taux de cendres (%)	2	2	2	12.5	2	2	2	2	2
	Dont sable et terre (%)	0	0	0	9.4	0	0	0	0	0
	Dont autres éléments minéraux (%)	2	2	2	3.15	2	2	2	2	2
	PCI (MWh_{PCI}/t brute)	2.73	3.18	3.18	3.18	2.73	2.73	2.73	2.73	2,445

*Les menus bois et souches représentent actuellement une partie extrêmement faible des approvisionnements. Le potentiel de récolte additionnelle de ces compartiments n'est cependant pas négligeable.

[111] Les porteurs sont des engins à plusieurs roues motrices, éventuellement articulés, munis d'une grue prolongée d'une pince permettant de charger pour les débarder des troncs prédécoupés (généralement de quelques mètres de long). Les débusqueurs ou « skidders » sont des tracteurs munis d'un treuil permettant de tracter et déplacer des troncs coupés de grande longueur.

4.1.3. Variantes du scénario 3 – Écorces et connexes de scierie ou papeterie

Mise en œuvre d'une chaufferie avec une puissance de plus de 50 MW

D'après les statistiques publiées par le Syndicat des Energie Renouvelables[112], les installations d'une puissance supérieure ou égale à 50 MW produisant de la chaleur représentent ~ 8 % de la puissance cumulée des chaufferies bois énergie. Comme le cadre réglementaire sur les émissions atmosphériques est différent selon que l'installation a une puissance inférieure ou supérieure à 50 MW, il est apparu nécessaire d'analyser en variante ce cas de figure.

Tableau 50 : Émissions atmosphériques d'une chaufferie d'une puissance ≥ 50 MW pour valoriser les connexes de scierie ou papeterie

	Scénario de base – S3	*Variantes*	Flux élémentaire
Poussières (g/MWh$_{PCI}$)	53	26,9	Tableau 32
SO_x (g/MWh$_{PCI}$)[113]	17		
NO_x (g/MWh$_{PCI}$)	415	335,8	
CO (g/MWh$_{PCI}$)	134		
Dioxines/furanes (ng/MWh$_{PCI}$)	144		
COVNM (g/MWh$_{PCI}$)	8,6		

	FE issus des rapports d'émissions de 110 chaufferies soutenue par le Fonds Chaleur de l'ADEME.
	FE issus du CITEPA, données OMINEA 2018 (pour une chaudière bois dans le secteur commercial et institutionnel de puissance < 50 MW). Le CITEPA ne fournit pas d'information différenciée par puissance.
	FE issus d'une campagne de mesure menée par l'ADEME sur 9 installations, datant de 2016 : https://www.ademe.fr/evaluation-performances-energetiques-environnementales-chaufferies-biomasse
	ICPE 3110. Les VLE sont celles qui s'appliquent aux installations d'une puissance supérieure ou égale à 50 MW autorisées à compter du 1er novembre 2010

4.1.4. Variante du scénario 6 – Granulés

Origine des granulés

Les granulés blancs sont importés depuis les USA/Canada par bateau et par camion.

Ils ne se distinguent pas par le type de biomasse utilisé ni par le fonctionnement de la chaufferie.

Tableau 51 : Données relatives à l'approvisionnement des granulés hors France

Procédé	Valeur		Unité	Source	ICV
	Cas de base	Variante			
Gestion et exploitation forestière	Non inclus		-		
Type de biomasse considérée	Résineux		-		
Transport des granulés jusqu'au port français					
Bateau (km)	0	10500	km	Hypothèses sur base de FCBA, 2012, ACV du granulé bois	Cf. Annexe 5 : Modélisation du transport
Camion (km)	0	600	km		
Taux de retour à vide	100		%		
Charge utile	27		t		
Transport des granulés du port français jusqu'à la chaufferie					
Camion	175		km	Hypothèses sur base de FCBA, 2012, ACV du granulé bois	Cf. Annexe 5 : Modélisation du transport
Taux de retour à vide	100		%		
Charge utile	27		t		

Utilisation de gaz naturel pour alimenter la chaufferie produisant la chaleur nécessaire au séchage des connexes

[112] https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/wp-content/uploads/basedoc/panorama-chaleur-2019-web.pdf

[113] Le fonctionnement dégradé pour les émissions de SO_x représente les installations utilisant des mauvais combustibles (mix avec des plaquettes d'une autre origine que celles issues directement de bois forestier).

Tableau 52 : Données et hypothèses relatives à la préparation des granulés – unité de production géographiquement intégrée à la scierie – Variante « gaz naturel »

		Valeur		Unité	Source	ICV	
		Cas de base	Variante				
Production des granulés							
Séchage	Humidité initiale	45		%	FCBA, 2012, ACV du granulé bois	-	
	Humidité finale	8		%		-	
	Énergie thermique	2,4		MJ/kg de granulés			
		2,6		MJ/kg anhydre			
	Combustible	Écorces/Broyat de palette	Gaz naturel	-		Cf. données du S3	Heat production, natural gas, at boiler condensing modulating > 100 kW, EI 3.5 (MJ)
	Cogénération	Non		-		-	
	Émissions	Cf. Tableau 32 – S3		-		Cf. Tableau 32	
	Cendres	5	-	%		Cf. Tableau 38	
Granulation	Humidité dans le granulé	1,1		kg de granulés/kg anhydre		-	
	Électricité[114]	0,165		kWh/kg anhydre		Électricité issue du réseau (Mix électrique FR)	
	Diesel	0,00065		litre/kg anhydre		market for diesel, low-sulfur, Europe without Switzerland, EI v3.5 (kg)	

Production de la chaleur nécessaire au séchage des connexes dans une unité de cogénération alimentée par de la biomasse (écorces et broyat de palettes)

Tableau 53 : Données et hypothèses relatives à la préparation des granulés – unité de production géographiquement intégrée à la scierie – Variante cogénération

		Valeur		Unité	Source	ICV
		Cas de base	Variante			
Production des granulés						
Séchage	Humidité initiale	45		%	FCBA, 2012, ACV du granulé bois	-
	Humidité finale	8		%		-
	Énergie thermique	2,4		MJ/kg de granulés		-
		2,6		MJ/kg anhydre		-
	Combustible	Écorces/Broyat de palettes		-		Cf. données du S3
	Cogénération	Non	Oui	-		-
	Rendement cogénération	0	47,5 (chaleur)	%		Autoconsommation pour le séchage
		0	20 (élec)	%		Substitution de l'électricité issue du réseau (Mix électrique FR)
	Émissions	Cf. Tableau 32 – S3		-		Cf. Tableau 32
	Cendres	5	5	%		Cf. Tableau 38
Granulation	Humidité dans le granulé	1,1		kg de granulés/kg anhydre		-
	Électricité[115]	0,165		kWh/kg anhydre		Electricité issue du réseau (Mix électrique FR)
	Diesel	0,00065		litre/kg anhydre		market for diesel, low-sulfur, Europe without Switzerland, EI v3.5 (kg)

4.2. Variabilités des choix méthodologiques

[114] Électricité pour le fonctionnement de la chaudière et le pressage (représentant l'essentiel de la consommation).
[115] Électricité pour le fonctionnement de la chaudière et le pressage (représentant l'essentiel de la consommation).

4.2.1. Méthode de résolution de la multifonctionnalité liée à la production de différents types de bois lors de la gestion sylvicole

Dans la présente section, les variantes se différencient entre elles sur base du type de biomasse et de l'allocation réalisée entre le BO et le BI/BE.

Tableau 54 : Différences prises en compte dans l'étude suivant l'origine de la biomasse et le type de produits récoltés – Variante dans la gestion de la multifonctionnalité

		Variante B	Variante B1	Variante F	Variante F1
Gestion sylvicoles	Sylviculture/Essence	Futaie de résineux (douglas)		Futaie de feuillus (chêne et hêtre)	
	Produits récoltés	BO BI/BE MB		BO BI/BE MB	
	Gestion de la multifonctionnalité	Affectation volumique 787 m³ BO 180 m³ BI/BE 203 m³ MB*	Affectation économique BI/BE : 12€/m³ BO : 56€/m³ MB 0€/m³*	Affectation volumique 838 m³ BO 557 m³ BI/BE 542 m³ MB*	Affectation économique BI/BE : 12€/m³ BO : 168€/m³ MB 0€/m³*
	Produits récoltés couverts par l'inventaire	BI/BE		BI/BE	
Transport vers la chaufferie	Quantité transportée (t)	227			
Fonctionnement de la chaufferie	Masse volumique apparente (t/map)	0,23		0,335	
	Taux d'humidité initial (% sur masse brute)	35		40	
	Taux d'humidité finale (% sur masse brute)	25			
	Perte de matière anhydre (dégradation par les micro-organismes) lors du séchage naturel (%)	12,5			
	Pertes d'eau lors du séchage (kg d'eau/t de combustible avant séchage)	162		226	
	Taux de cendres (%)	2			
	Dont sable et terre (%)	0			
	Dont autres éléments minéraux (%)	2			

Pas d'affectation réalisée car les MB sont considérés comme des déchets

4.2.2. Méthode de résolution de la multifonctionnalité liée à la production de différents types de bois lors de la transformation

Dans la présente section, les variantes se différencient entre elles sur base du type de biomasse et de l'allocation réalisée entre les différents types de bois issus de la première transformation du bois (en scierie) : connexes et bois d'œuvre.

Tableau 55 : Description des étapes du cycle de vie étudiées – Granulés issus de connexes de scierie (production géographiquement intégrée[116]) – Variantes

Étapes du cycle de vie			Cas de base – S6		Variantes	
			Processus inclus	Processus exclus	Processus inclus	Processus exclus
Gestion sylvicole pour la production/récolte de la biomasse	Approvisionnement en matière première (MP) – bois constituant le granulé	Production de la MP		Sylviculture (nurserie, éclaircie), exploitation forestière	Sylviculture (nurserie, éclaircie), exploitation forestière – cf. Tableau 48	
		Prélèvement de la MP		Débardage	Débardage	
	Approvisionnement en matière première (MP) – bois constituant le combustible utilisé pour sécher le granulé – écorce	Production de la MP		Sylviculture, exploitation forestière	Sylviculture, exploitation forestière – cf. Tableau 48	
		Prélèvement de la MP		Débardage	Débardage	
	Approvisionnement en matière première (MP) – bois constituant le combustible – broyat	Production de la MP		Sylviculture (nurserie, éclaircie), exploitation forestière		Sylviculture (nurserie, éclaircie), exploitation forestière
		Prélèvement de la MP		Débardage		Débardage
Transformation	Préparation du bois pour d'autres usages (bois d'œuvre)	Transport de la MP		Consommation de gasoil Production du camion Infrastructures Entretien	Consommation de gasoil Production du camion Infrastructures Entretien	
		Écorçage - sciage		Consommation de gasoil Consommation d'électricité Lubrifiant Infrastructures	Consommation de gasoil Consommation d'électricité Infrastructures	Lubrifiant
		Rabotage		Consommation de gasoil Consommation d'électricité Lubrifiant Infrastructures	Consommation de gasoil Consommation d'électricité Infrastructures	Lubrifiant
		Broyage		Consommation d'électricité	Consommation d'électricité	
	Préparation du combustible - broyat de palettes	Broyage		Consommation d'électricité	Consommation d'électricité	
	Préparation granulés	Séchage	Consommation de chaleur (Combustible utilisé : écorces/broyat de palettes)		Consommation de chaleur (Combustible utilisé : écorces/broyat de palettes)	
		Granulation	Consommation de gasoil Consommation d'électricité		Consommation de gasoil Consommation d'électricité	
Stockage et distribution	Transport des granulés	Transport jusqu'à la chaufferie	Consommation de gasoil Production du camion Infrastructures Entretien		Consommation de gasoil Production du camion Infrastructures Entretien	
Utilisation	Combustion	Combustion en chaufferie	Émissions atmosphériques		Émissions atmosphériques	
		Traitement des émissions	Production des réactifs nécessaires au traitement		Production des réactifs nécessaires au traitement	
		Consommation d'énergie pour le fonctionnement	Consommation d'électricité		Consommation d'électricité	
		Infrastructures	Production des infrastructures Fin de vie des infrastructures	Maintenance	Production des infrastructures Fin de vie des infrastructures	Maintenance
		Gestion des cendres	Épandage Enfouissement		Épandage Enfouissement	
Distribution via un réseau de chaleur						

L'itinéraire de gestion sylvicole considéré en cas de base est la futaie de résineux (douglas). L'affectation de l'étape « Croissance et gestion de la biomasse » et des premières étapes de transformation du bois est réalisée sur base d'une affectation volumique entre déchets de sciage/rabotage et les sciages. L'affectation aux granulés est réalisée sur base du taux d'écorce + taux de connexes à partir desquels sont réalisés les granulés.

[116] Utilisation des connexes de sciage et de rabotage générés par la scierie comme matières premières pour la fabrication des granulés.

Le bois issu du reconditionnement des palettes est considéré comme un déchet.

Tableau 56 : Données et hypothèses relatives à la prise en compte des étapes amont à la préparation des granulés

	Valeur		Unité	Source	ICV
	Cas de base	Variante			
Ecorçage/sciage – Affectation massique (masse anhydre) pour les étapes d'écorçage/sciage et la gestion sylvicole					
Sciages	100	54	%	Hypothèse sur base de FCBA, 2012, ACV du granulé bois	-
Connexes de sciage/rabotage	0	39	%		-
Écorces	0	7	%		
Écorçage/sciage					
Rendement	51		%	Hypothèse sur base de FCBA, 2012, ACV du granulé bois	-
	0,51		m³ scié/m³ issu forêt		-
Électricité	31		kWh/m³ scié		Électricité issue du réseau (Mix électrique FR)
Diesel	0,01		litre/m³ scié		market for diesel, low-sulfur, Europe without Switzerland, EI v3.5 (kg)
Broyage des connexes et de l'écorce					
Électricité	0	0,03	kWh/kg anhydre	Hypothèse sur base de FCBA, 2012, ACV du granulé bois	Électricité issue du réseau (Mix électrique FR)
Broyage des palettes					
Électricité	0	0,015	kWh/kg anhydre	Hypothèse sur base de FCBA, 2012, ACV du granulé bois	Électricité issue du réseau (Mix électrique FR)

5. Résultats

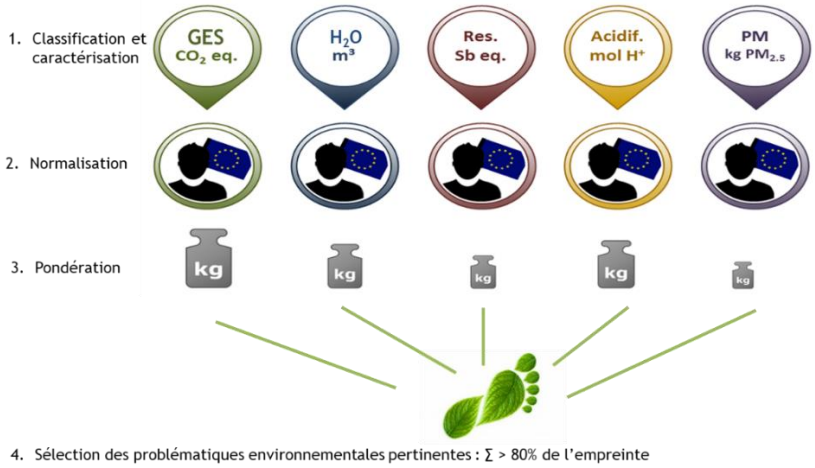
5.1. Enjeux environnementaux pertinents pour les filières bois énergie

La détermination des enjeux environnementaux pertinents pour les filières bois énergie étudiées dans le cadre de ce projet a été réalisée en appliquant la méthode de normalisation/pondération du projet européen Product Environmental Footprint (PEF)[117]. Cette méthode consiste en quatre étapes :

1. Classification et caractérisation des contributions ;
2. Normalisation sur base de l'impact d'un équivalent habitant européen sur une année ;
3. Pondération des enjeux environnementaux ;
4. Sélection des problématiques environnementales pertinentes.

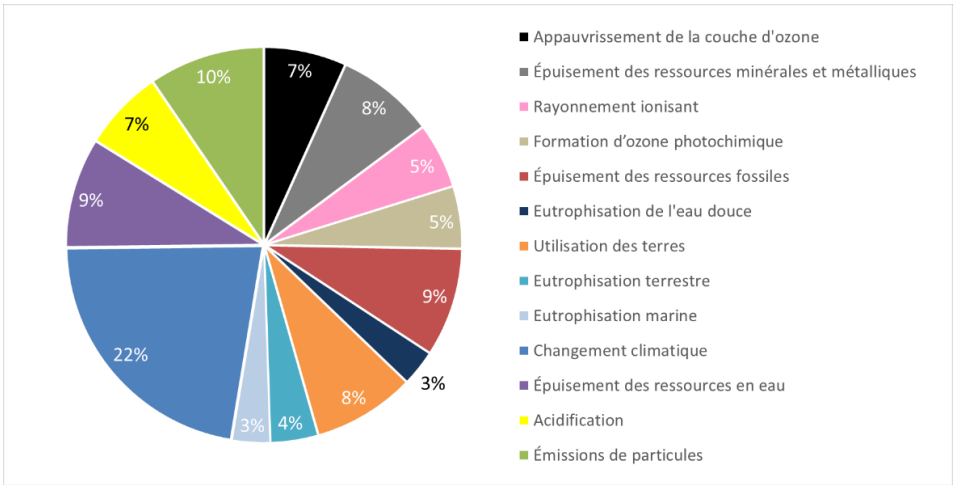
Les informations détaillées relatives à la normalisation et à la pondération sont présentées en annexe au paragraphes 8.3 et 8.4.

Figure 12 : Méthode utilisée pour la détermination des enjeux environnementaux pertinents



Les facteurs de pondération sont présentés à la figure ci-dessous.

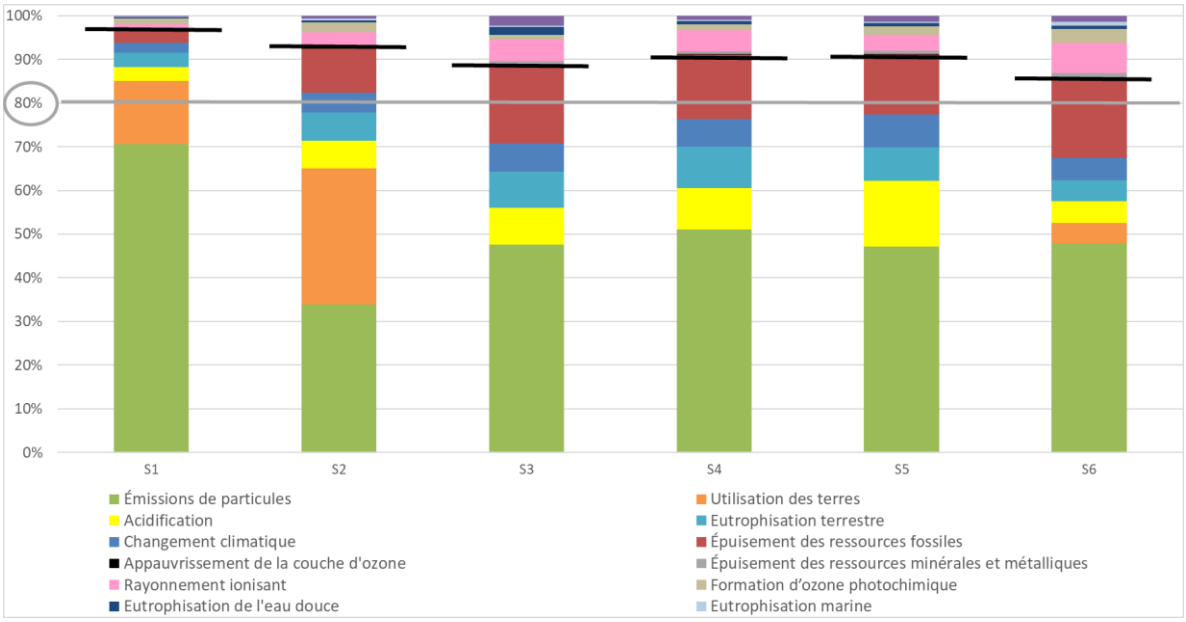
Figure 13 : Facteurs de pondération



[117] https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/ef_pilots.htm

Les enjeux pertinents sont définis comme étant ceux dont la somme des contributions à l'empreinte totale atteint a minima 80 % de celle-ci (ligne grise) pour chaque scénario.

Figure 14 : Répartition en pourcentage de l'empreinte environnementale entre les différents enjeux environnementaux



Étant donné que les enjeux pertinents diffèrent d'un scénario à un autre et comme l'objectif recherché est de couvrir les enjeux pertinents pour l'ensemble des scénarios, les enjeux environnementaux qui sont identifiés comme les plus pertinents pour les filières bois énergie étudiées sont :

- émissions de particules ;
- utilisation des terres ;
- acidification de l'air ;
- eutrophisation terrestre ;
- changement climatique ;
- utilisation des ressources fossiles (et nucléaires).

Avec les 6 enjeux ci-dessus, le minima de 80 % est dépassé pour l'ensemble des scénarios (ligne noire).

5.2. Étapes les plus contributrices pour chaque filière bois énergie

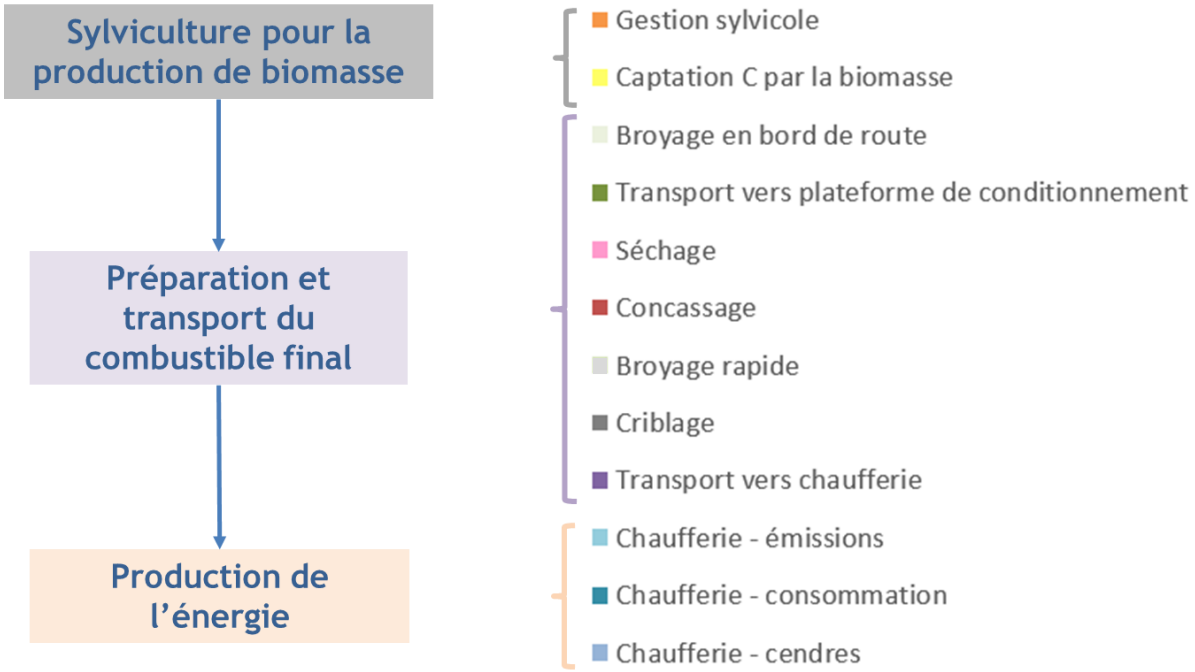
5.2.1. Préalable – Guide de lecture des résultats

Les résultats de l'évaluation environnementale des impacts du cycle de vie présentés ci-après sont des expressions relatives et dès lors ne prédisent pas :

- les effets sur les impacts finaux (ressources, santé humaine et biodiversité) ;
- les dépassement des seuils légaux ;
- les marges de sécurité ou les risques.

Dans les figures suivantes, le code couleur utilisé est tel que défini ci-dessous :

Figure 15 : Code couleur utilisé dans les illustrations



Concernant la comptabilité du carbone biogénique, le principe appliqué est la comptabilité totale à savoir la comptabilisation des captations de CO_2 en négatif et des émissions de CO/CO_2 en positif.

À noter que les infrastructures de la chaufferie sont reprises dans la phase « Chaufferie – consommation ».

Seuls les scénarios 1-6 sont présentés étant donné qu'ils se rapportent à des filières d'approvisionnement différentes des chaudières en combustibles. Les scénarios 7-9 se rapportant à la même filière d'approvisionnement que celle du scénario 2, les résultats ne sont pas présentés dans cette section visant à identifier les étapes les plus contributrices par filière bois énergie.

5.2.2. Scénario 1 – Plaquette forestière sèche

Tableau 57 : Rappel des principales caractéristiques du scénario 1

	Source biomasse		Taillis de feuillus
	Type de produit récolté		BI/BE + 70%MB_{pl}
	Type de sylviculture		Exploitation et débardage
	Préparation	Broyage en bord de route	✓
		Transport vers plateforme de préparation	✓
		Broyage en plateforme	✗
		Séchage	✓ - Naturel
		Concassage	✗
		Broyage rapide	✗
		Criblage	✓
	Type de combustible obtenu		Plaquette forestière sèche
	Taux d'humidité initial – final (%)		45 %-25 %
	PCI (MWh_{PCI}/t_{brute})		3,04
	Masse volumique (t/map)		0,26
	Densité anhydre[118] (sans écorce) (t/m³)		0,59
	Transport vers la chaufferie		✓
	Puissance		0-0,5 MW
	Usage		Alimentation d'un réseau de chaleur
	Rendement		80 %
	Dépoussiérage	Multi-cyclone (MC)	✓
		Électrofiltre (EF) Filtre à manche (FAM)	✗
	SNCR		✗
	Autres traitements		✗
	Devenir des cendres		Épandage

La contribution aux différents enjeux environnementaux pour la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières calibrées sèches est mentionnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 58 : Contribution du scénario 1 aux enjeux environnementaux pertinents pour la filière bois énergie

Enjeux environnementaux	Valeur	Unités
Changement climatique	16,42	kg CO_2 éq./MWh $_{th}$
Émissions de particules	9 10^{-5}	incidence de maladie/MWh $_{th}$
Acidification de l'air	0,5	moles H+ éq./MWh $_{th}$
Eutrophisation terrestre	2,9	moles N éq MWh $_{th}$
Utilisation des terres	43 701	points/MWh $_{th}$
Utilisation des ressources fossiles	455	MJ éq./MWh $_{th}$

[118] Humidité = 0%

La figure ci-dessous présente pour chaque enjeu environnemental du tableau ci-dessous la répartition par étape du cycle de vie sur 100 %. Pour l'ensemble des enjeux, les principales étapes contributrices sont :

- les émissions issues de la combustion à la chaufferie ;
- la production, gestion et exploitation de la biomasse forestière ;
- les pertes de matière anhydre lors du séchage (dégradation par les micro-organismes) – émissions de CO_2 biogénique ;
- les consommations énergétiques et autres consommables pour le fonctionnement de la chaufferie ;
- le broyage en bord de route ;
- les transports vers la plateforme de conditionnement et vers la chaufferie.

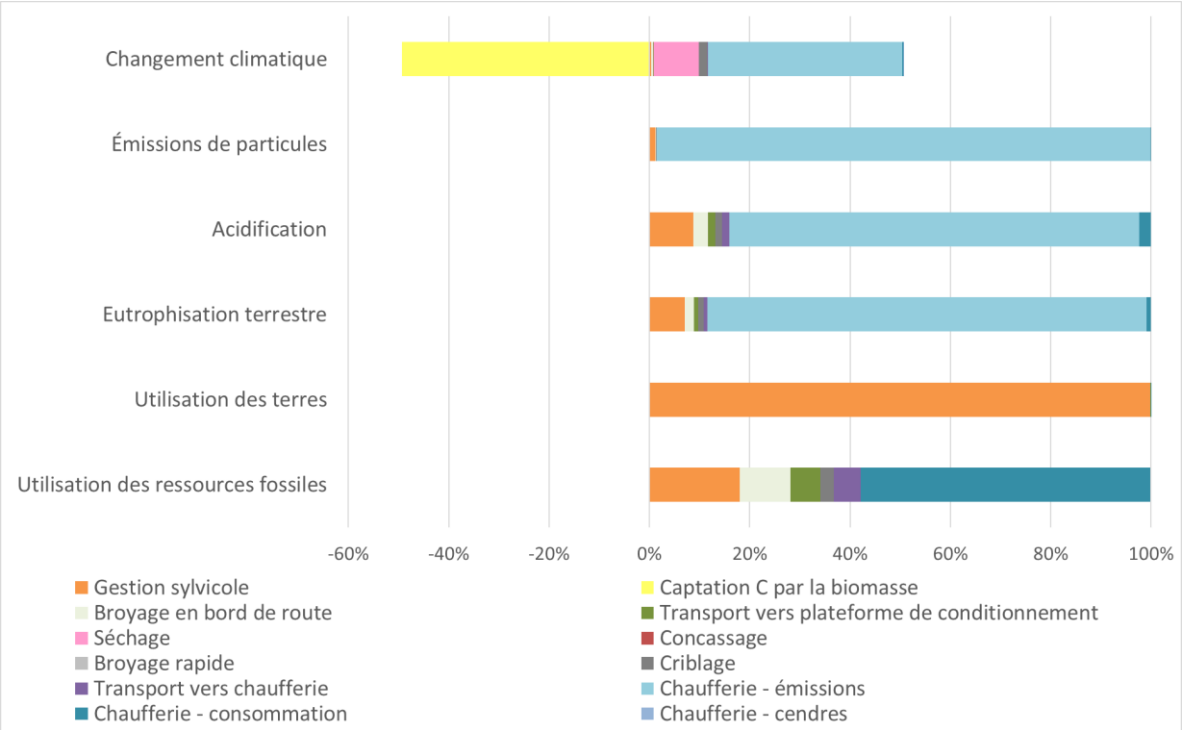
Les spécificités par enjeux sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 59 : Étapes contributrices aux enjeux environnementaux pour le scénario 1

	Captation C	Gestion sylvicole	Broyage	Criblage	Séchage	Transport Transport	Fonctionnement chaufferie	Combustion
Changement climatique (fossile et biogénique)	++				+			++
Émissions de particules		+						+++
Acidification de l'air		++	+	+		+	+	+++
Eutrophisation terrestre		++	+			+	+	+++
Utilisation des terres		+++						
Utilisation des ressources fossiles		++	+	+		+	+++	

Légende : +++ : fortement contributeur (>80 %) ++ : moyennement contributeur (10 %<x<80 %)
+ : faiblement contributeur (<10 %) Cellule vide : non contributeur
Les valeurs quantitatives sont présentées à la Figure 16.

Figure 16 : Scénario 1 - Contribution (en %) des différentes étapes de la filière aux enjeux environnementaux pertinents



Les résultats par étape du cycle de vie en valeur absolue sont présentés à l' Annexe 11 : Résultats en valeur absolue page 234. La Figure 41 présente les résultats pour l'enjeu « Changement climatique » avec hypothèse de neutralité carbone biogénique des émissions CO_2 de combustion du bois.

5.2.3. Scénario 2 – Plaquette forestière humide

Tableau 60 : Rappel des principales caractéristiques du scénario 2

	Source biomasse		Taillis de feuillus
	Type de produit récolté		BI/BE + 70%MB_{pl}
	Type de sylviculture		Exploitation et débardage
	Préparation	Broyage en bord de route	✓
		Transport vers plateforme de préparation	✗
		Broyage en plateforme	✗
		Séchage	✗
		Concassage	✗
		Broyage rapide	✗
		Criblage	✗
	Type de combustible obtenu		Plaquette forestière humide
	Taux d'humidité initial – final (%)		45 %-45 %
	PCI (MWh_{PCI}/t_{brute})		3,61
	Masse volumique (t/map)		0,36
	Densité anhydre[119] (sans écorce) (t/m³)		0,59
	Transport vers la chaufferie		✓
	Puissance		0,5-5 MW
	Usage		Alimentation d'un réseau de chaleur
	Rendement		85 %
	Dépoussiérage	Multi-cyclone (MC)	✓
		Électrofiltre (EF) Filtre à manche (FAM)	✓
	SNCR		✗
	Autres traitements		✗
	Devenir des cendres		Épandage

La contribution aux différents enjeux environnementaux pour la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières calibrées humides est mentionnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 61 : Contribution du scénario 2 aux enjeux environnementaux pertinents pour la filière bois énergie

Enjeux environnementaux	Valeur	Unités
Changement climatique	12,3	kg CO_2 éq./MWh $_{th}$
Émissions de particules	1,5 10^{-5}	incidences de maladies/MWh $_{th}$
Acidification de l'air	0,36	moles H+ éq./MWh $_{th}$
Eutrophisation terrestre	1,96	moles N éq/MWh $_{th}$
Utilisation des terres	33 240	points/MWh $_{th}$
Utilisation des ressources fossiles	500	MJ éq./MWh $_{th}$

[119] Humidité = 0%

La figure ci-dessous présente pour chaque enjeu environnemental du tableau ci-dessous la répartition par étape du cycle de vie sur 100 %. Pour l'ensemble des enjeux, les principales étapes contributrices sont :

- les émissions issues de la combustion à la chaufferie ;
- la production, gestion et exploitation de la biomasse forestière ;
- les consommations énergétiques et autres consommables pour le fonctionnement de la chaufferie ;
- le broyage rapide ;
- le transport vers la chaufferie.

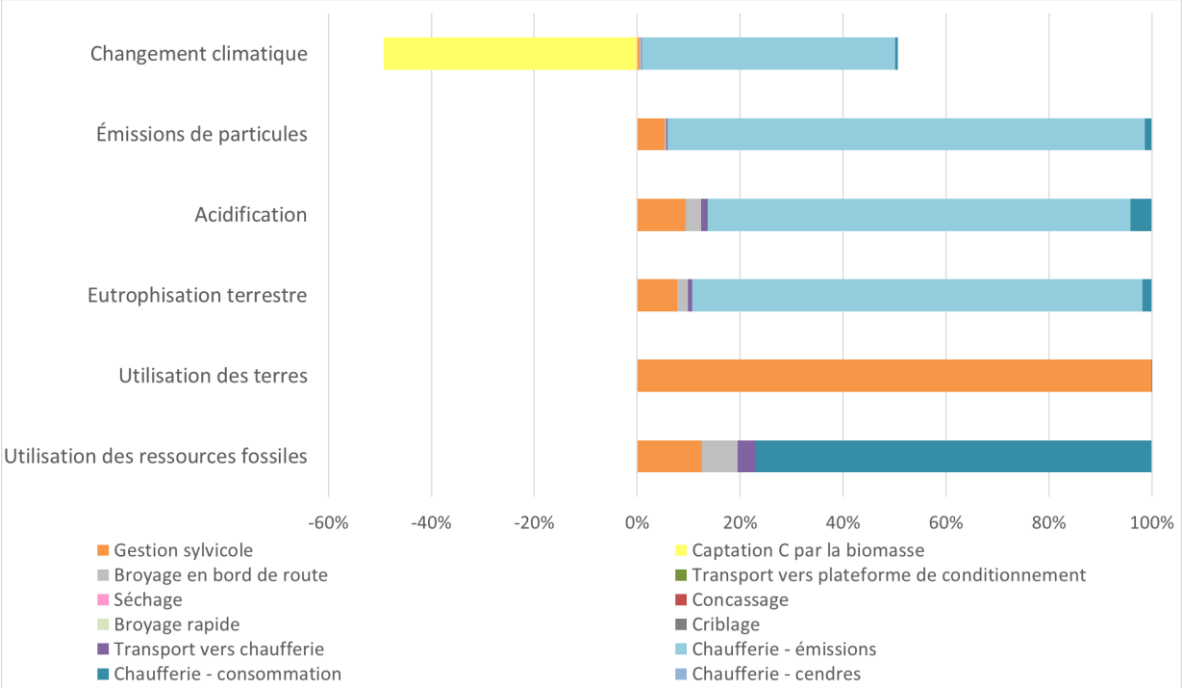
Les spécificités par enjeux sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 62 : Étapes contributrices aux enjeux environnementaux pour le scénario 2

	Captation de C	Gestion sylvicole	Broyage	Transport	Fonctionnement de la chaufferie	Combustion
Changement climatique	++					++
Émissions de particules		+				+++
Acidification de l'air		++	+	+	+	+++
Eutrophisation terrestre		++	+	+	+	+++
Utilisation des terres		+++				
Utilisation des ressources fossiles		++	+	+	+++	

Légende : +++ : fortement contributeur (>80 %) ++ : moyennement contributeur (10 %<x<80 %)
+ : faiblement contributeur (<10 %) Cellule vide : non contributeur
Les valeurs quantitatives sont présentées à la Figure 17.

Figure 17 : Scénario 2 - Contribution (en %) des différentes étapes de la filière aux enjeux environnementaux pertinents



Les résultats par étape du cycle de vie en valeur absolue sont présentés à l' Annexe 11 : Résultats en valeur absolue page 234. La Figure 41 présente les résultats pour l'enjeu « Changement climatique » avec hypothèse de neutralité carbone biogénique des émissions CO_2 de combustion du bois.

5.2.4. Scénario 3 - Connexes de scierie ou papeterie

Tableau 63 : Rappel des principales caractéristiques du scénario 3

	Source biomasse		/
	Type de produit récolté		/
	Type de sylviculture		/
	Préparation	Broyage en bord de route	✗
		Transport vers plateforme de préparation	✗
		Broyage en plateforme	✗
		Séchage	✗
		Concassage	✗
		Broyage rapide	✓
		Criblage	✗
	Type de combustible obtenu		Connexes
	Taux d'humidité initial – final (%)		45 %-45 %
	PCI (MWh_{PCI}/t_{brute})		2,44
	Masse volumique (t/map)		0,33
	Densité anhydre[120] (sans écorce) (t/m³)		-
	Transport vers la chaufferie		✗
	Puissance		5-50 MW
	Usage		Industriel
	Rendement		85 %
	Dépoussiérage	Multi-cyclone (MC)	✓
		Électrofiltre (EF) Filtre à manche (FAM)	✓
	SNCR		✓
	Autres traitements		✗
	Devenir des cendres		Épandage

La contribution aux différents enjeux environnementaux pour la production d'1 MWh de chaleur à partir de connexes de scieries ou papeterie est mentionnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 64 : Contribution du scénario 3 aux enjeux environnementaux pertinents pour la filière bois énergie

Enjeux environnementaux	Valeur	Unités
Changement climatique	14,9	kg CO_2 éq./MWh $_{th}$
Émissions de particules	1,34 10^{-5}	incidences de maladies/MWh $_{th}$
Acidification de l'air	0,3	moles H+ éq./MWh $_{th}$
Eutrophisation terrestre	1,58	moles N éq/MWh $_{th}$
Utilisation des terres	27	points/MWh $_{th}$
Utilisation des ressources fossiles	540	MJ éq. /MWh $_{th}$

[120] Humidité = 0%

La figure ci-dessous présente pour chaque enjeu environnemental du tableau ci-dessous la répartition par étape du cycle de vie sur 100 %. Pour l'ensemble des enjeux, les principales étapes contributrices sont :

- émissions issues de la combustion à la chaufferie ;
- les consommations énergétiques et autres consommables pour le fonctionnement de la chaufferie.

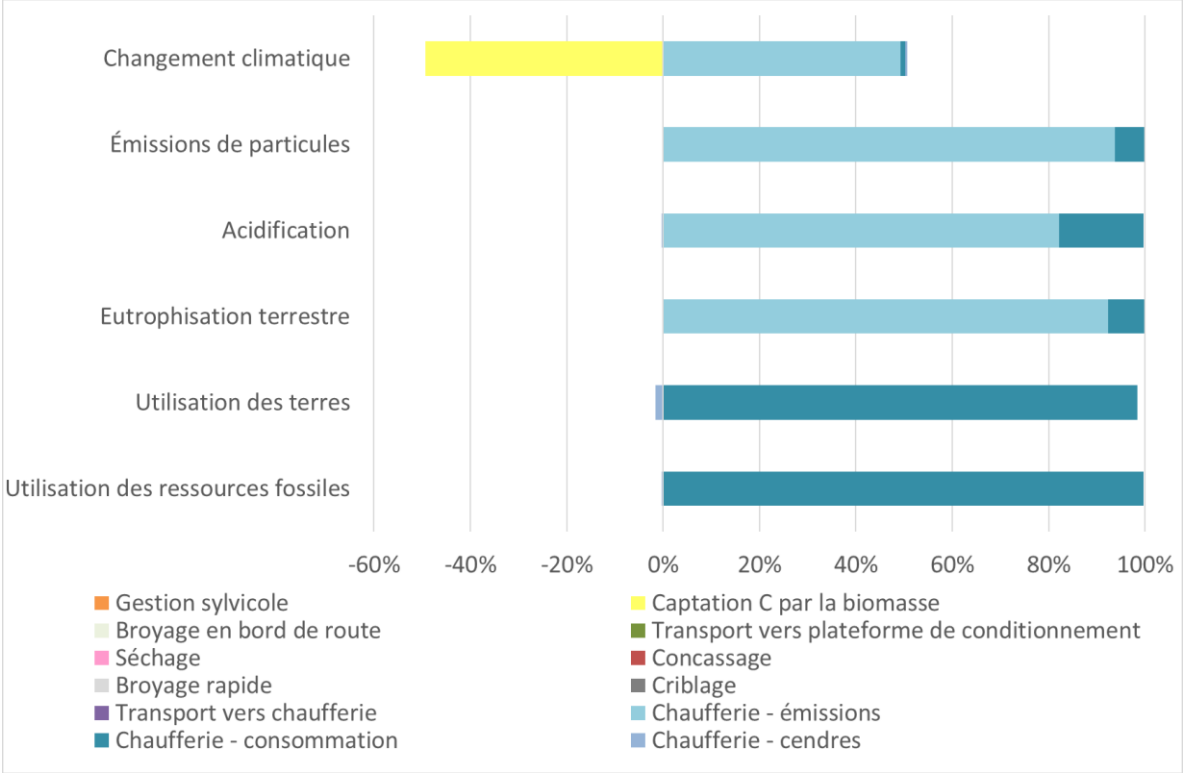
Les spécificités par enjeux sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 65 : Étapes contributrices aux enjeux environnementaux pour le scénario 3

	Captation de C	Fonctionnement de la chaufferie	Combustion
Changement climatique	++	+	++
Émissions de particules		+	+++
Acidification de l'air		++	+++
Eutrophisation terrestre		+	+++
Utilisation des terres		+++	
Utilisation des ressources fossiles		+++	

Légende : +++ : fortement contributeur (>80 %) ++ : moyennement contributeur (10 %<x<80 %)
+ : faiblement contributeur (<10 %) Cellule vide : non contributeur
Les valeurs quantitatives sont présentées à la Figure 18.

Figure 18 : Scénario 3 - Contribution (en %) des différentes étapes de la filière aux enjeux environnementaux pertinents



Les résultats par étape du cycle de vie en valeur absolue sont présentés à l'Annexe 11 : Résultats en valeur absolue page 234. La Figure 41 présente les résultats pour l'enjeu « Changement climatique » avec hypothèse de neutralité carbone biogénique des émissions CO_2 de combustion du bois.

5.2.5. Scénario 4 - Déchets de bois « propre »

Tableau 66 : Rappel des principales caractéristiques du scénario 4

	Source biomasse		/
	Type de produit récolté		/
	Type de sylviculture		/
	Préparation	Broyage en bord de route	✗
		Transport vers plateforme de préparation	✗
		Broyage en plateforme	✗
		Séchage	✗
		Concassage	✓
		Broyage rapide	✓
		Criblage	✗
	Type de combustible obtenu		Déchets de bois « propre »
	Taux d'humidité initial – final (%)		/-20 %
	PCI (MWh_{PCI}/t_{brute})		3,98
	Masse volumique (t/map)		0,2
	Densité anhydre[121] (sans écorce) (t/m³)		-
	Transport vers la chaufferie		✓
	Puissance		0,5-5 MW
	Usage		Alimentation d'un réseau de chaleur
	Rendement		85 %
	Dépoussiérage	Multi-cyclone (MC)	✓
		Électrofiltre (EF) Filtre à manche (FAM)	✓
	SNCR		✗
	Autres traitements		✗
	Devenir des cendres		Épandage

La contribution aux différents enjeux environnementaux pour la production d'1 MWh de chaleur à partir de déchets de bois « propre » est mentionnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 67 : Contribution du scénario 4 aux enjeux environnementaux pertinents pour la filière bois énergie

Enjeux environnementaux	Valeur	Unités
Changement climatique	10.9	kg CO_2 éq./MWh $_{th}$
Émissions de particules	1,45 10^{-5}	incidences de maladies/MWh $_{th}$
Acidification de l'air	0,34	moles H+ éq./MWh $_{th}$
Eutrophisation terrestre	1,8	moles N éq/MWh $_{th}$
Utilisation des terres	43	points/MWh $_{th}$
Utilisation des ressources fossiles	456	MJ éq /MWh $_{th}$

[121] Humidité = 0%

La figure ci-dessous présente pour chaque enjeu environnemental du tableau ci-dessous la répartition par étape du cycle de vie sur 100 %. Pour l'ensemble des enjeux, les principales étapes contributrices sont :

- émissions issues de la combustion à la chaufferie ;
- les consommations énergétiques et autres consommables pour le fonctionnement de la chaufferie ;
- le broyage rapide et le concassage lors de la préparation ;
- le transport vers la chaufferie.

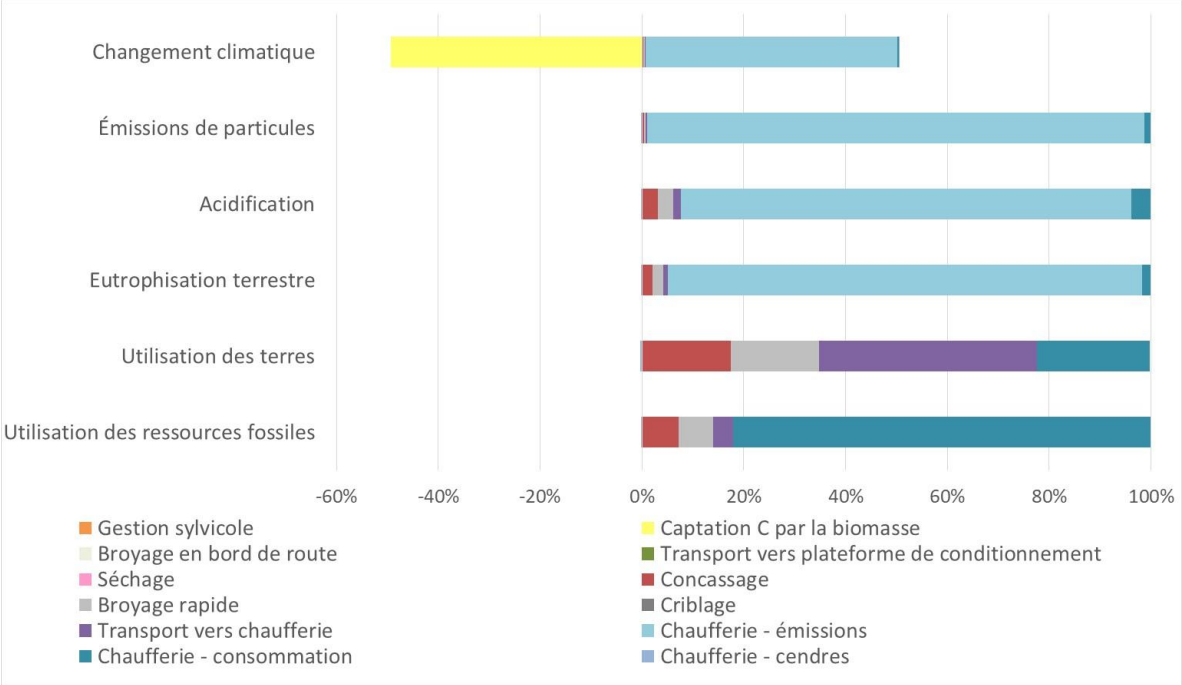
Les spécificités par enjeux sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 68 : Étapes contributrices aux enjeux environnementaux pour le scénario 4

	Captation de C	Concassage	Broyage	Transport vers la chaufferie	Fonctionnement de la chaufferie	Combustion
Changement climatique	++				+	++
Émissions de particules					+	+++
Acidification de l'air		++	++	+	++	+++
Eutrophisation terrestre		++	++	+	++	+++
Utilisation des terres		+	+	+	+	
Utilisation des ressources fossiles		+	+	+	+++	

Légende : +++ : fortement contributeur (>80 %) ++ : moyennement contributeur (10 %<x<80 %)
+ : faiblement contributeur (<10 %) Cellule vide : non contributeur
Les valeurs quantitatives sont présentées à la Figure 19.

Figure 19 : Scénario 4 - Contribution (en %) des différentes étapes de la filière aux enjeux environnementaux pertinents



Les résultats par étape du cycle de vie en valeur absolue sont présentés à l'Annexe 11 : Résultats en valeur absolue page 234. La Figure 41 présente les résultats pour l'enjeu « Changement climatique » avec hypothèse de neutralité carbone biogénique des émissions CO_2 de combustion du bois.

5.2.6. Scénario 5 - Déchets de bois « adjuvanté »

Tableau 69 : Rappel des principales caractéristiques du scénario 5

	Source biomasse		/
	Type de produit récolté		/
	Type de sylviculture		/
	Préparation	Broyage en bord de route	✗
		Transport vers plateforme de préparation	✗
		Broyage en plateforme	✗
		Séchage	✗
		Concassage	✓
		Broyage rapide	✓
		Criblage	✓
	Type de combustible obtenu		Déchets de bois « adjuvanté »
	Taux d'humidité initial – final (%)		/-20 %
	PCI (MWh_{PCI}/t_{brute})		3,98
	Masse volumique (t/map)		0,2
	Densité anhydre[122] (sans écorce) (t/m³)		-
	Transport vers la chaufferie		✓
	Puissance		5-50 MW
	Usage		Industriel
	Rendement		85 %
	Dépoussiérage	Multi-cyclone (MC)	✓
		Électrofiltre (EF) Filtre à manche (FAM)	✓
	SNCR		✓
	Autres traitements		✓
	Devenir des cendres		Épandage

La contribution aux différents enjeux environnementaux de la production pour la production d'1 MWh de chaleur à partir de déchets de bois « adjuvanté » est mentionnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 70 : Contribution du scénario 5 aux enjeux environnementaux pertinents pour la filière bois énergie

Enjeux environnementaux	Valeur	Unités
Changement climatique	17.4	kg CO_2 éq /MWh $_{th}$
Émissions de particules	1,9 10^{-5}	incidences de maladies/MWh $_{th}$
Acidification de l'air	0,76	moles H+ éq./MWh $_{th}$
Eutrophisation terrestre	2,1	moles N éq/MWh $_{th}$
Utilisation des terres	60,1	points/MWh $_{th}$
Utilisation des ressources fossiles	602	MJ éq./MWh $_{th}$

[122] Humidité = 0%

La figure ci-dessous présente pour chaque enjeu environnemental du tableau ci-dessous la répartition par étape du cycle de vie sur 100 %. Pour l'ensemble des enjeux, les principales étapes contributrices sont :

- les émissions issues de la combustion à la chaufferie ;
- les consommations énergétiques et autres consommables pour le fonctionnement de la chaufferie ;
- le broyage, le concassage et le criblage lors de la préparation ;
- le transport vers la chaufferie.

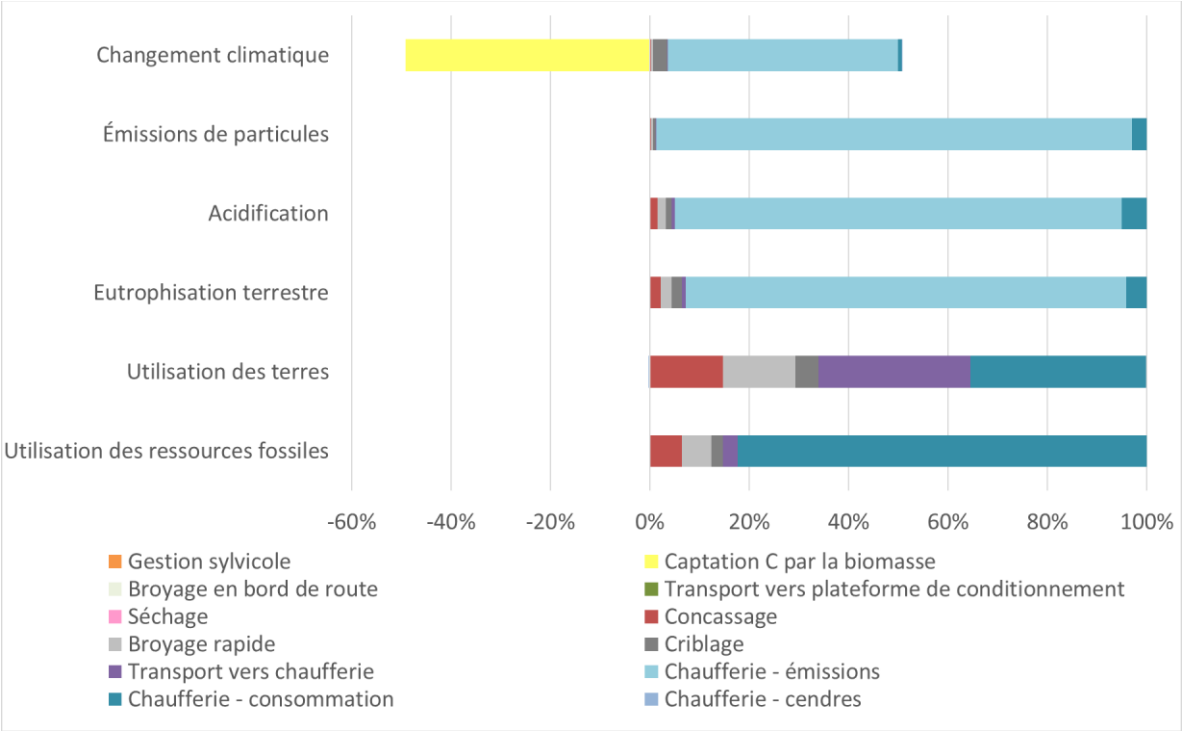
Les spécificités par enjeux sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 71 : Étapes contributrices aux enjeux environnementaux pour le scénario 5

	Captation de C	Concassage	Broyage	Criblage	Transport vers la chaufferie	Fonctionnement de la chaufferie	Combustion
Changement climatique	++			+		+	++
Émissions de particules						+	+++
Acidification de l'air		+	+	+	+	++	+++
Eutrophisation terrestre		+	+	+	+	++	+++
Utilisation des terres		++	++	+	++	++	
Utilisation des ressources fossiles		+	+	+	+	+++	

Légende : +++ : fortement contributeur (>80 %) ++ : moyennement contributeur (10 %<x<80 %)
+ : faiblement contributeur (<10 %) Cellule vide : non contributeur
Les valeurs quantitatives sont présentées à la Figure 20.

Figure 20 : Scénario 5 - Contribution (en %) des différentes étapes de la filière aux enjeux environnementaux pertinents



Les résultats par étape du cycle de vie en valeur absolue sont présentés à l'Annexe 11 : Résultats en valeur absolue page 234. La Figure 41 présente les résultats pour l'enjeu « Changement climatique » avec hypothèse de neutralité carbone biogénique des émissions CO_2 de combustion du bois.

5.2.7. Scénario 6 - Granulés

Tableau 72 : Rappel des principales caractéristiques du scénario 6

	Source biomasse	/
	Type de produit récolté	/

	Type de sylviculture		/
	Préparation	Broyage en bord de route	/
		Transport vers plateforme de préparation	/
		Broyage en plateforme	/
		Séchage	/
		Concassage	/
		Broyage rapide	/
		Criblage	/
	Granulation (dont séchage)		✓
	Type de combustible obtenu		Granulés blancs
	Taux d'humidité initial – final (%)		45 %-8 %
	PCI (MWh_{PCI}/t_{brute})		4,86
	Masse volumique (t/map)		0,75
	Densité anhydre[123] (sans écorce) (t/m³)		-
	Transport vers la chaufferie		✓
	Puissance		0-0,5 MW
	Usage		Climatique
	Rendement		80 %
	Dépoussiérage	Multi-cyclone (MC)	✓
		Électrofiltre (EF) Filtre à manche (FAM)	✗
	SNCR		✗
	Autres traitements		✗
	Devenir des cendres		Épandage

La contribution aux différents enjeux environnementaux pour la production d'1 MWh de chaleur à partir de granulés est mentionnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 73 : Contribution du scénario 6 aux enjeux environnementaux pertinents pour la filière bois énergie

Enjeux environnementaux	Valeur	Unités
Changement climatique	11,3	kg CO_2 éq /MWh $_{th}$
Émissions de particules	2,0 10^{-5}	incidences de maladies/MWh $_{th}$
Acidification de l'air	0,26	moles H+ éq./MWh $_{th}$
Eutrophisation terrestre	1,4	moles N éq/MWh $_{th}$
Utilisation des terres	4642	points/MWh $_{th}$
Utilisation des ressources fossiles	825	MJ éq./MWh $_{th}$

La figure ci-dessous présente pour chaque enjeu environnemental du tableau ci-dessous la répartition par étape du cycle de vie sur 100 %. Pour l'ensemble des enjeux, les principales étapes contributrices sont :

- les émissions issues de la combustion à la chaufferie ;
- les consommations énergétiques et autres consommables pour le fonctionnement de la chaufferie ;
- la préparation des granulés (granulation et séchage) ;
- le transport vers la chaufferie.

[123] Humidité = 0%

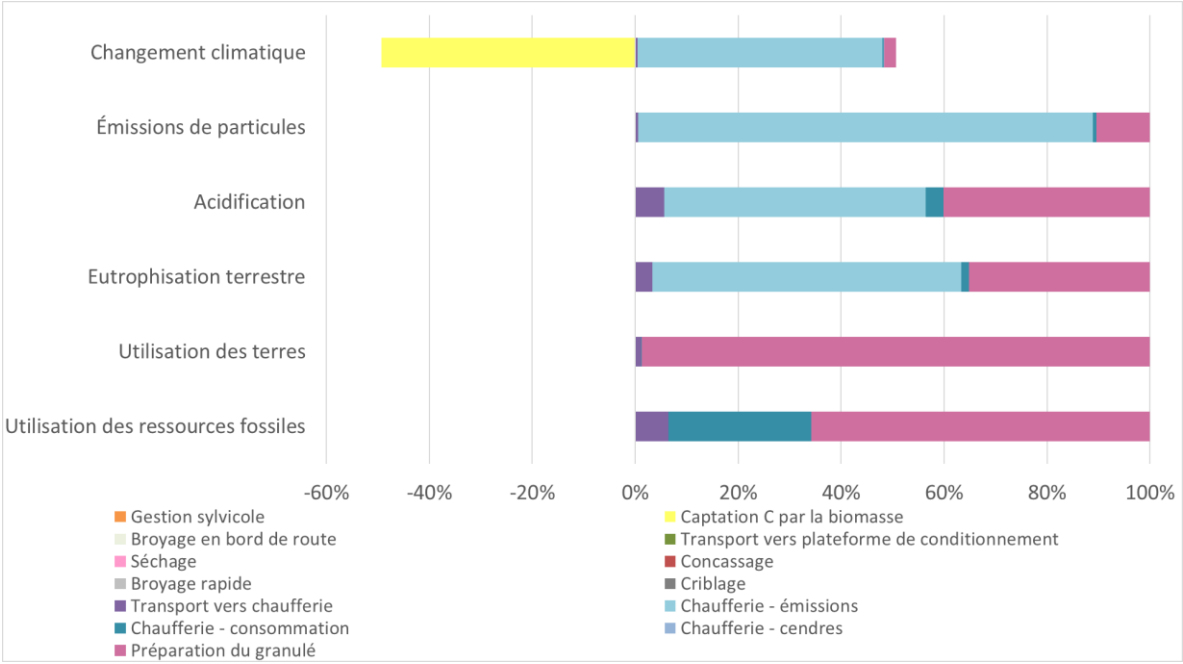
Les spécificités par enjeux sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 74 : Étapes contributrices aux enjeux environnementaux pour le scénario 6

	Captation de C	Préparation du granulé	Transport vers la chaufferie	Fonctionnement de la chaufferie	Combustion
Émissions de particules		++	+	+	+++
Changement climatique	++	+			++
Acidification de l'air		++	+	+	++
Eutrophisation terrestre		++	+	+	++
Utilisation des terres		++	+		
Utilisation des ressources fossiles		++	+	++	

Légende : +++ : fortement contributeur (>80 %) ++ : moyennement contributeur (10 %<x<80 %)
+ : faiblement contributeur (<10 %) Cellule vide : non contributeur
Les valeurs quantitatives sont présentées à la Figure 21.

Figure 21 : Scénario 6 - Contribution (en %) des différentes étapes de la filière aux enjeux environnementaux pertinents



Les résultats par étape du cycle de vie en valeur absolue sont présentés à l'Annexe 11 : Résultats en valeur absolue page 234. La Figure 41 présente les résultats pour l'enjeu « Changement climatique » avec hypothèse de neutralité carbone biogénique des émissions CO_2 de combustion du bois.

5.3. Influence de différents paramètres de terrain sur le bilan environnemental

Contrairement à la section 4.1 page 57 qui présente les variantes par scénario, les variantes ont été classées par thématique :

- source d'approvisionnement de la biomasse ;
- type de préparation des combustibles ;
- conception et conditions d'exploitation des chaufferies.

5.3.1. Source d'approvisionnement de la biomasse

Origine de la biomasse forestière servant à fabriquer les plaquettes

Analyse centrée sur l'étape de gestion sylvicole

Le tableau ci-dessous reprend la hiérarchie entre les différentes filières d'approvisionnement de la biomasse au sein de chacun des 6 enjeux environnementaux étudiés dans le cadre de cette étude pour la production d'1 m³ de biomasse.

Tableau 75: Influence de l'origine de la biomasse forestière pour la production des plaquettes forestières – Focus étape de gestion sylvicole uniquement - Hiérarchie

	Futaie résineux - MB	Futaie feuillus - MB	Futaie feuillus	Taillis de feuillus	Futaie résineux	Transformation Taillis feuillus en Futaie résineux	Deprise agricole - TCR - Euca	Futaie résineux Souche
Changement climatique	1	2	3	4	5	5	7	6
Emissions de particules	1	1	1	2	3	3	3	4
Acidification de l'air	1	1	2	3	4	4	1	5
Eutrophisation terrestre	1	1	1	2	3	3	4	5
Utilisation des sols	2	1	8	7	5	6	4	3
Utilisation des ressources fossiles et nucléaires	1	2	3	4	5	6	7	7

Légende : 1 : filière la moins contributrice 4/5/6/8 : filière la plus contributrice

**Les menus bois et souches représentent actuellement une partie extrêmement faible des approvisionnements. Le potentiel de récolte additionnelle de ces compartiments n'est cependant pas négligeable.*

Le tableau ci-dessous présente les contributions de la gestion sylvicole des différentes filières d'approvisionnement de la biomasse aux 6 enjeux environnementaux étudiés dans le cadre de cette étude.

Tableau 76: Influence de l'origine de la biomasse forestière pour la production des plaquettes forestières – Focus étape de gestion sylvicole uniquement – Valeurs absolues

	Futaie résineux - MB	Futaie feuillus - MB	Futaie feuillus	Taillis de feuillus	Futaie Douglas	Transformation Taillis feuillus en Futaie résineux	Deprise agricole - TCR - Euca	Futaie résineux Souche
Changement climatique (kg éq CO2/m³)	4.3	4.7	6	8	10	11	18	16
Emissions de particules (incidence de maladie/m³)	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.7E-06	2.6E-06	2.7E-06	2.8E-06	4.1E-06
Acidification de l'air (moles H+/m³)	0.04	0.04	0.05	0.07	0.10	0.11	0.04	0.16
Eutrophisation terrestre (moles N/m³)	0.21	0.20	0.23	0.32	0.49	0.50	0.64	0.76
Utilisation des sols (point/m³)	11	5	83 917	69 216	42 889	47 879	29 938	37
Utilisation des ressources fossiles et nucléaires (MJ éq/m³)	63	71	99	122	154	161	226	227

Pour la plupart des enjeux environnementaux étudiés (hormis l'utilisation des sols) :

- La récolte des souches en futaie de résineux présente la contribution la plus élevée et cela malgré le fait que les souches sont considérées comme des déchets et que seul la récolte et le débardage sont inclus. Cela est dû à la consommation de ressources énergétiques élevées liée à ces deux étapes.
- La récolte des menus bois (MB) présente la contribution la plus faible du fait que les MB sont considérés comme des déchets dont seul la récolte et le débardage sont inclus.

La contribution des différentes sous-étapes prises en compte lors de la gestion sylvicole pour les différentes filières d'approvisionnement de la biomasse et pour les 6 enjeux environnementaux étudiés dans le cadre de cette étude est présentée ci-dessous. Pour la plupart des itinéraires de gestion sylvicole considérés, les étapes suivantes dominent la contribution aux enjeux environnementaux étudiés :

- la récolte ;
- le débardage.

Tableau 77: Gamme de contribution (en %) des différentes sous-étapes inclus dans l'étape de gestion sylvicole aux différents enjeux environnementaux

	Taillis feuillus	Futaie résineux	Futaie feuillus	Futaie résineux - MB	Futaie feuillus - MB	Futaie résineux Souche	Deprise agricole - TCR - Euca
Mise à disposition des plants	0%	1-2%	0%	0%		0%	0%
Fertilisation	0%	0%	0%	0%		0%	15-35%
Autres étapes de la sylviculture	0%	13-15%	3-10%	0%		0%	5-15%
Récolte	45-65%	45%	60-75%	0%		70-75%	5-15%
Débardage	35-55%	40%	20-35%	100%		20-25%	15-25%

**Les menus bois et souches représentent actuellement une partie extrêmement faible des approvisionnements. Le potentiel de récolte additionnelle de ces compartiments n'est cependant pas négligeable.*

Analyse sur l'ensemble du cycle de vie

Hormis les étapes de gestion sylvicoles considérées, les variantes se différencient sur base de :

- La masse volumique apparente :

Les masses volumiques des essences étudiées se classent de la manière suivante : Eucalyptus > Feuillus > Résineux.

- Le taux d'humidité initiale :

Les taux d'humidité des essences étudiées se classent de la manière suivante : Eucalyptus > Feuillus > Résineux.

- Le taux de cendres :
  - 1 à 3 % de cendres est considéré en cas de base ;
  - 10-15 % est considéré pour les souches.
- Le taux de sable et terre : il est pris en compte uniquement pour les filières « souche ».
- Le taux d'autres éléments minéraux : il est pris en compte uniquement pour les filières « souche ».
- Le PCI (MWhPCI/tbrute) :

Les PCI des différentes essences se classent de la manière suivante : PCI Résineux > PCI Feuillus > PCI Eucalyptus.

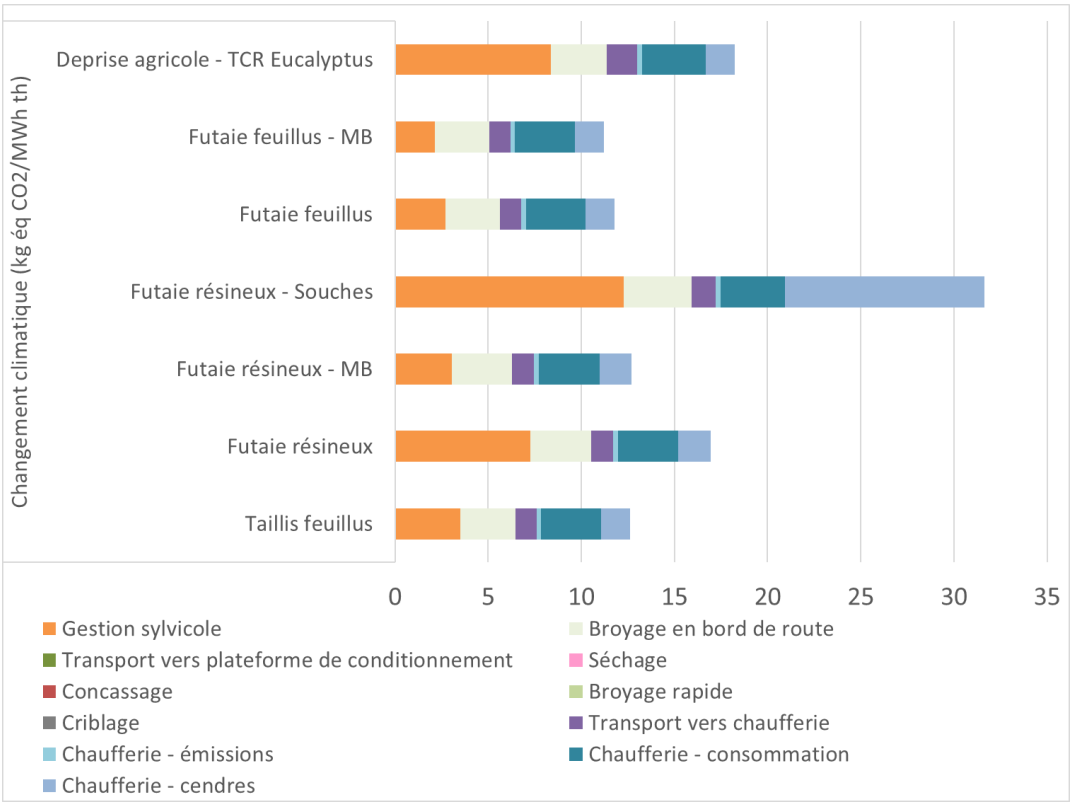
Lorsque l'on regarde l'ensemble du cycle de vie, la gestion sylvicole, tel que présentée en orange sur les figures ci-dessous, représente :

1. Entre 20–45 % de la contribution au changement climatique (Figure 22) ;
2. Entre 10–30 % de l'utilisation des ressources fossiles et nucléaires (Figure 23).

Suivant les filières d'approvisionnement de la biomasse, le résultat de l'évaluation pour ces deux indicateurs peut varier de façon significative (voir figures ci-dessous). Notons que les étapes sylvicoles considérées ne sont pas les mêmes pour chaque filière d'approvisionnement.

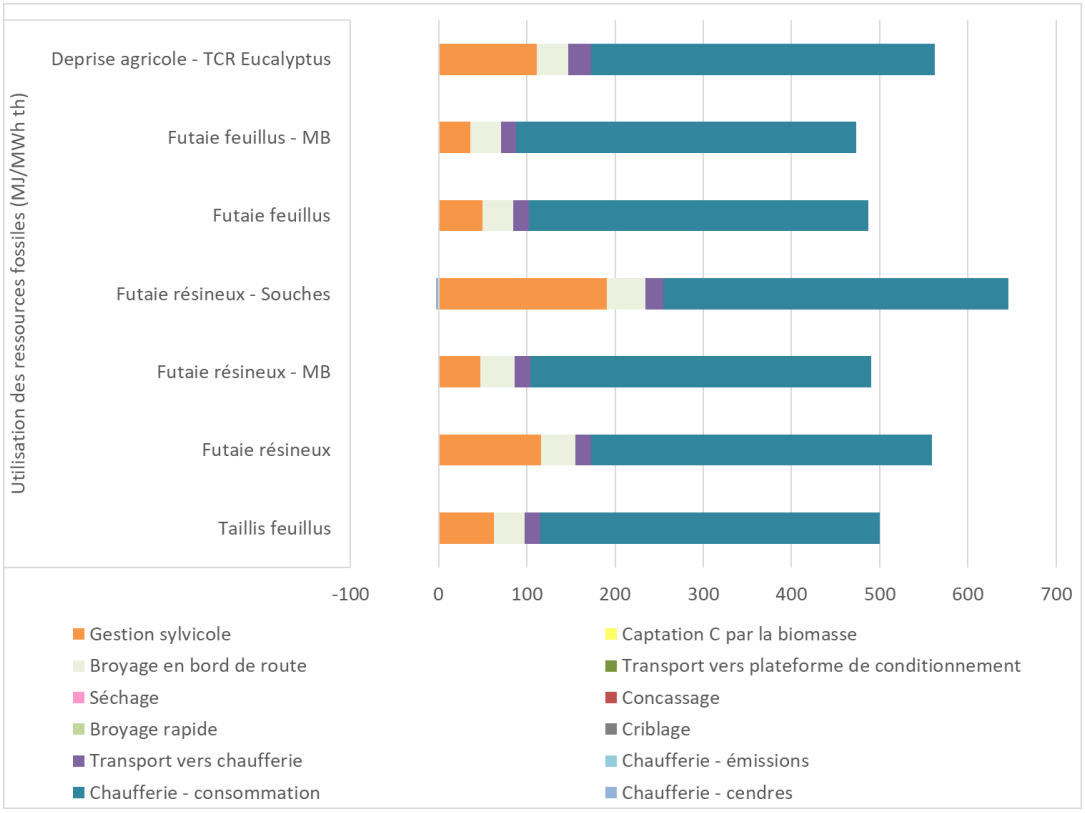
Comme on le voit dans la Figure 22, les scénarios de TCR et d'utilisation des souches ont une contribution au changement climatique plus élevée. Pour les TCR, cela peut s'expliquer par une étape de sylviculture intégrant des étapes de plantation et de fertilisation. Pour l'utilisation des souches, cela peut s'expliquer par l'étape de récolte des souches qui est plus énergivore, et un taux de cendres plus élevé impliquant une gestion plus conséquente.

Figure 22 : Contribution au changement climatique des différentes filières de production de la biomasse utilisée pour produire les plaquettes forestières (kg CO_2 éq/MWh_{PCI}) (neutralité carbone des émissions CO_2 biogénique)



Les cendres enfouies sont considérées comme se dégradant partiellement (5 % du carbone contenu) en CO_2 ou CH_4 lors de l'enfouissement.

Figure 23 : Contribution à l'utilisation de ressources fossiles et nucléaires des différentes filières de production de la biomasse utilisée pour produire les plaquettes forestières (MJ éq/MWh_{PCI})



Distance d'approvisionnement de la biomasse forestière

Plaquettes forestières

Cette analyse est réalisée en comparaison avec le scénario 2 « Chaufferie alimentée par des plaquettes forestières humides d'une puissance de 0,5 à 5 MW ».

La figure et le tableau ci-dessous présentent la différence de contribution à certains des 6 enjeux environnementaux étudiés dans le cadre de cette étude entre :

- une filière d'approvisionnement locale en plaquettes forestières (35 km) (scénario étudié dans le cas de base) ;
- une filière d'approvisionnement en plaquettes forestières régionale (200 km) ou nationale (500 km).

Les filières régionale et nationale présentent une contribution supérieure de quelques pourcents à plus de 100 % suivant les enjeux environnementaux étudiés.

- Émissions de particules (issues de la combustion de carburants) :
  - 200 km : +1 %,
  - 500 km : +3 % ;
- Changement climatique (issu de la combustion de carburants) :
  - 200 km : +43 %,
  - 500 km : +120 % ;
- Acidification (issue de la combustion de carburants) :
  - 200 km : +6 %,
  - 500 km : +18 %.

Figure 24 : Influence de la provenance des plaquettes forestières par rapport au scénario S2 utilisé en cas de base

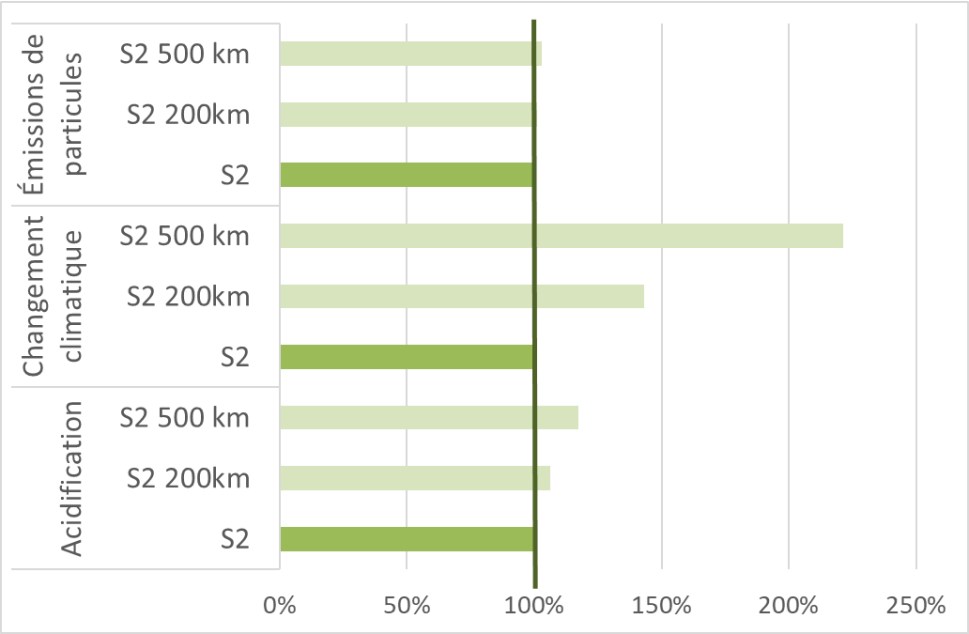


Tableau 78 : Influence de la provenance des plaquettes forestières par rapport au scénario S2 utilisé en cas de base

Enjeux environnementaux	Valeur de base	Valeur variante 200 km	Valeur variante 500 km	Unités
Émissions de particules	$1{,}53\ 10^{-5}$	$1{,}54\ 10^{-5}$	$1{,}57\ 10^{-5}$	incidences de maladies/MWh $_{th}$
Changement climatique	12,3	17,6	27,3	kg CO_2 éq./MWh $_{th}$
Acidification de l'air	0,36	0,38	0,42	moles H+ éq./MWh $_{th}$

Granulés

La seconde analyse menée sur cette thématique est réalisée en comparaison avec le scénario 6 « Chaufferie alimentée par des granulés issus de connexes d'une puissance de 0 à 0,5 MW ».

La figure et le tableau ci-dessous présente la différence de contribution aux enjeux environnementaux, étudiés dans le cadre de cette étude, entre :

- une filière d'approvisionnement française des granulés blancs (175 km en camion) ;
- une filière d'approvisionnement américaine des granulés blancs (775 km de camion et 10 500 km de bateau).

Les deux filières d'approvisionnement ne diffèrent entre elles que par la distance à parcourir et le mode de transport à utiliser.

La filière américaine présente une contribution aux enjeux environnementaux étudiés supérieure de quelques pourcents à plus de 200 % suivants les enjeux environnementaux.

- Émissions de particules : +5 % (issues de la combustion de carburants) ;
- Changement climatique : +450 % (issu de la combustion et consommation de carburants) ;
- Acidification : +61 % (issu de la combustion de carburants) ;
- Utilisation des terres : +8 % (issue des infrastructures routières) ;
- Utilisation des ressources fossiles : +94 % (issue de la consommation de carburants).

L'enjeu « Eutrophisation terrestre » n'est pas présenté en détails étant donné que le principal flux contributeur est l'oxyde d'azote qui est lui-même le principal flux contributeur pour l'enjeu « Acidification de l'air », qui est lui présenté en détails.

Figure 25 : Influence de la provenance des granulés blancs par rapport au scénario S6 utilisé en cas de base

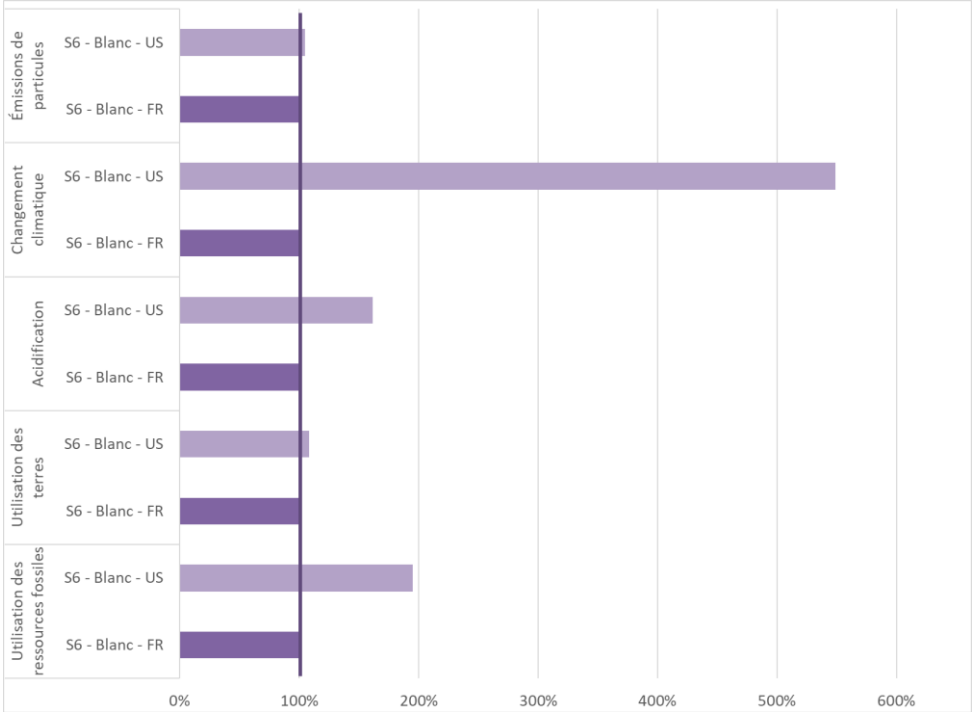


Tableau 79 : Influence de la provenance des granulés blancs par rapport au scénario S6 utilisé en cas de base

Enjeux environnementaux	Valeur de base - FR	Valeur variante - US	Unités
Émissions de particules	2,0 10^{-5}	2,1 10^{-5}	incidences de maladies/MWh $_{th}$
Changement climatique	11,3	62,1	kg CO_2 éq./MWh $_{th}$
Acidification de l'air	0,26	0,41	moles H+ éq./MWh $_{th}$
Utilisation des terres	4642	5028	points/MWh $_{th}$
Utilisation des ressources fossiles	825	1608	MJ éq./MWh $_{th}$

5.3.2. Type de préparation des combustibles

Séchage forcé et broyage des rondins sur plateforme plutôt qu'en bord de route

Cette analyse est réalisée en comparaison avec le scénario 1 « Chaufferie alimentée par des plaquettes forestières sèches d'une puissance de 0 à 0,5 MW ».

La figure et le tableau ci-dessous présentent la différence de contribution aux enjeux environnementaux, étudiés dans le cadre de cette étude, entre une filière avec un séchage naturel et un broyage en bord de route (S1) et deux filières qui se distinguent :

- soit par le broyage des rondins en plateforme plutôt qu'en bord de route (S1 – Broyage plateforme) ;
- soit par le séchage forcé en lieu et place d'un séchage naturel (S1 – Séchage forcé).

Le broyage sur plateforme, qui se différencie du broyage en rondins par les consommations d'énergie nécessaires et le transport, engendre pour certains enjeux environnementaux des contributions légèrement supérieures et pour d'autres légèrement inférieures :

- Émissions de particules : 0 % ;
- Changement climatique : +7 % ;
- Acidification : 0 % ;
- Utilisation des terres : -11 % ;
- Utilisation des ressources fossiles : +5 %.

Le séchage forcé, qui est réalisé via la production de chaleur et une répartition (en terme d'énergie thermique fournie) de 1/3 issue de biomasse et 2/3 de gaz naturel, engendre pour la plupart des enjeux environnementaux des contributions supérieures :

- Émissions de particules : +3 % ;
- Changement climatique : +160 % ;
- Acidification : +9 % ;
- Utilisation des terres : -6 % ;
- Utilisation des ressources fossiles : +93 %.

L'enjeu « Eutrophisation terrestre » n'est pas discuté en détails étant donné que le principal flux contributeur est l'oxyde d'azote qui est lui-même le principal flux contributeur pour l'enjeu « Acidification de l'air », qui est lui présenté en détails.

La contribution la plus élevée étant obtenue pour l'enjeu en lien direct avec cette utilisation de ressources fossiles.

Figure 26 : Influence du type de préparation des plaquettes forestières par rapport au scénario S1 utilisé en cas de base

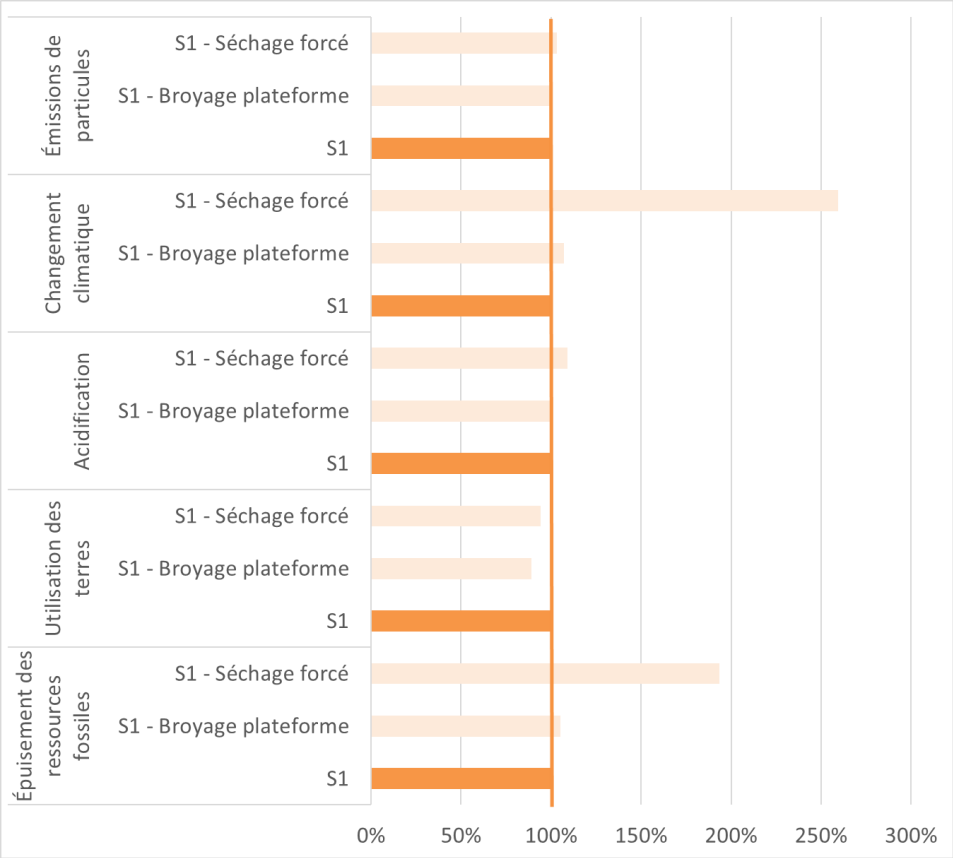


Tableau 80 : Influence du type de préparation des plaquettes forestières par rapport au scénario S1 utilisé en cas de base

Enjeux environnementaux	Valeur de base	Valeur – Broyage plateforme	Valeur – Séchage forcé	Unités
Émissions de particules	$9\ 10^{-5}$	$9\ 10^{-5}$	$9{,}3\ 10^{-5}$	incidence de maladie/MWh $_{th}$
Changement climatique	16,4	17,6	42,6	kg CO_2 éq./MWh $_{th}$
Acidification de l'air	0,50	0,51	0,55	moles H+ éq./MWh $_{th}$
Utilisation des terres	43 700	38 905	41 100	points/MWh $_{th}$
Utilisation des ressources fossiles	454	478	880	MJ éq./MWh $_{th}$

5.3.3. Conception et conditions d'exploitation des chaufferies

Analyse relative aux émissions lors de la combustion

Mise en place d'un traitement secondaire de type SNCR

Cette analyse est réalisée en comparaison avec le scénario 2 « Chaufferie alimentée par des plaquettes forestières humides d'une puissance de 0,5 à 5 MW ».

La figure ci-dessous présente la différence de contribution aux enjeux environnementaux, étudiés dans le cadre de cette étude, entre cette filière et une filière présentant des émissions d'oxydes d'azote réduites de par la mise en œuvre d'un traitement secondaire de type « SNCR ».

À noter que trois taux d'abattement sont considérés (40, 55 et 70 %) et par simplification les consommations de consommables sont considérées comme étant similaires quel que soit le taux d'abattement considéré.

D'après la figure ci-dessous, il ressort que la mise en place d'un traitement SNCR engendre des transferts d'impacts entre enjeux environnementaux à savoir une réduction de la contribution à l'acidification de l'air et une augmentation de la contribution au changement climatique, aux émissions de particules et à l'utilisation de ressources fossiles.

La contribution à l'acidification évolue en fait de manière opposée :

- réduction de la contribution suite à l'abattement des émissions d'oxydes d'azote (en jaune) ;
- augmentation de la contribution suite à l'émission d'ammoniaque résultant du processus (en vert).

Au global, cela résulte en une diminution de la contribution allant de 14 à 34 % suivant le taux d'abattement considéré.

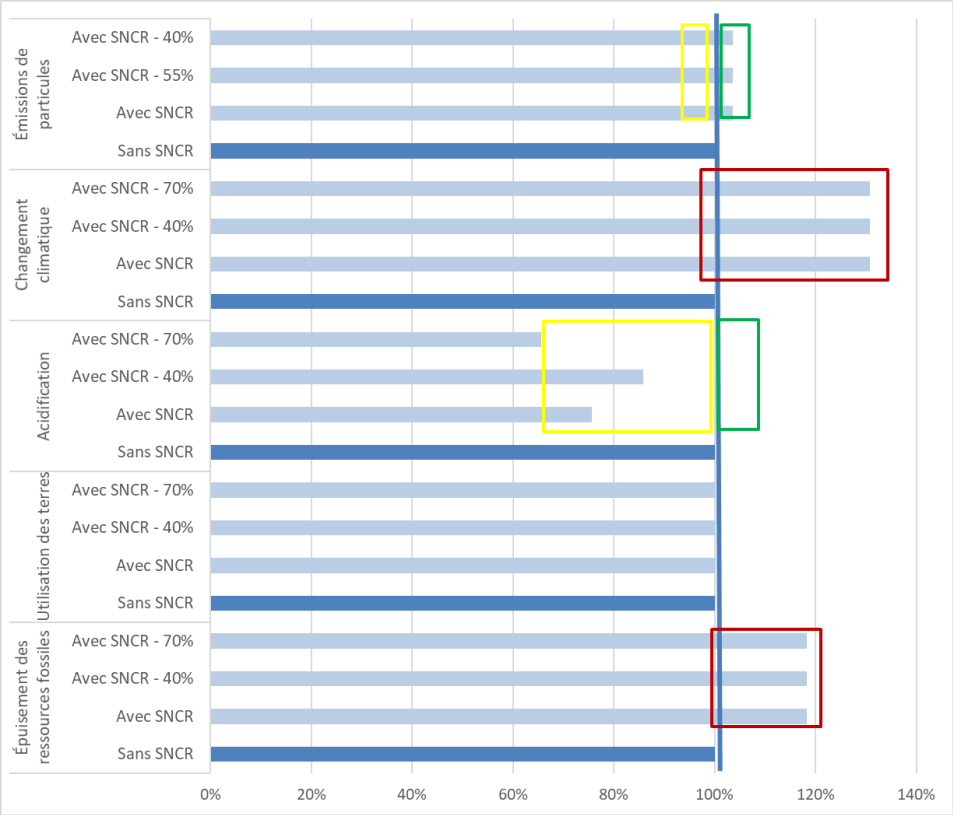
L'augmentation de la contribution aux autres enjeux est principalement liée à la production des réactifs nécessaires au fonctionnement du processus SNCR (en rouge).

À noter que :

- la mise en œuvre d'un SNCR nécessite un pilotage fin et ne peut être mis en œuvre sur des chaufferies à régime variable (telles que celles visant à alimenter un réseau de chaleur) sous peine de voir les émissions d'ammoniac augmentée considérablement ;
- le cas présent se veut illustratif de l'influence que peut avoir un système SNCR car il est en général mis en œuvre sur des chaufferies de plus grosse puissance pour lesquelles les exigences sont plus élevées ;
- parmi les installations existantes ce sont le plus souvent des systèmes de type SCR qui sont mis en œuvre.

L'enjeu « Eutrophisation terrestre » n'est pas présenté en détails étant donné que le principal flux contributeur est l'oxyde d'azote qui est lui-même le principal flux contributeur pour l'enjeu « Acidification de l'air », qui est lui présenté en détails.

Figure 27 : Influence de la mise en place d'un système de réduction des émissions d'oxydes d'azote de type SNCR



Influence du non-respect de la réglementation et mise en conformité avec la nouvelle réglementation

Cette analyse est réalisée en comparaison avec le scénario 2 « Chaufferie alimentée par des plaquettes forestières humides d'une puissance de 0,5 à 5 MW ».

La figure et le tableau ci-dessous présentent la différence de contribution aux enjeux environnementaux, étudiés dans le cadre de cette étude, entre cette filière et des filières présentant :

- soit des émissions supérieures à la réglementation actuelle (exercice théorique) ;
- soit des émissions conformes à la nouvelle réglementation entrée en vigueur en 2018.

D'après la figure et le tableau ci-dessous, il ressort que :

- le respect de la nouvelle réglementation permet de diminuer les contributions à l'acidification et à l'émission de particules étant donné les plus faibles émissions permises pour les oxydes d'azote et les poussières ;
- le non-respect de la réglementation (dépassement des émissions autorisées - exercice théorique) :
  - pour le SOx, engendre un accroissement de la contribution à l'acidification,
  - pour les PM, engendre un accroissement de la contribution à l'acidification et à l'émission de particules,
  - pour les NOx, engendre un accroissement de la contribution à l'acidification.

Figure 28 : Influence du respect de la réglementation

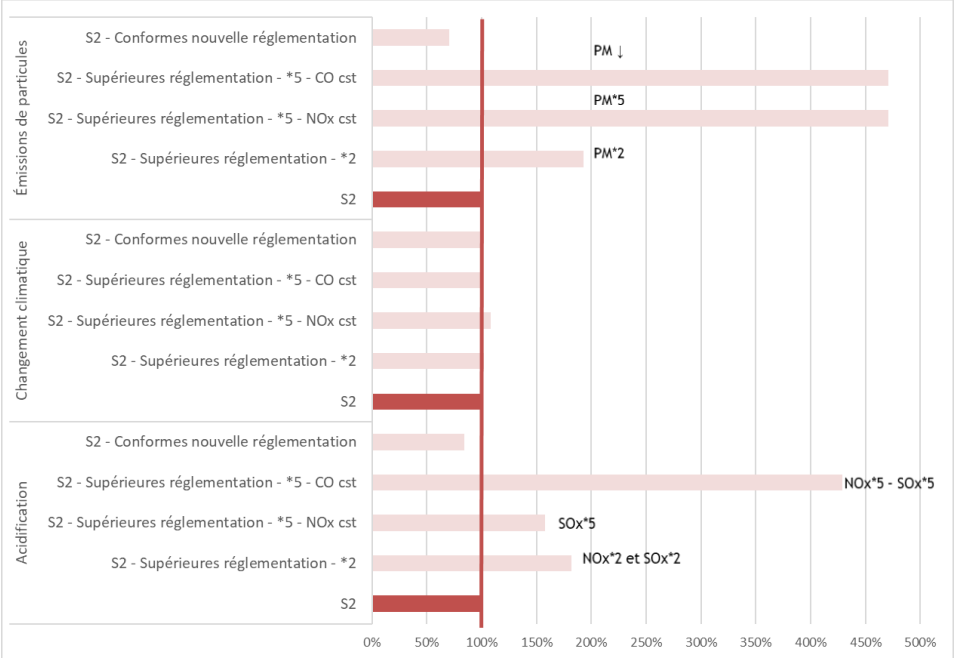


Tableau 81 : Influence du respect de la réglementation par rapport au scénario S2 utilisé en cas de base

Enjeux environnementaux	Valeur de base	Valeur variante *2	Valeur variante *5 NOx constant	Valeur variante *5 CO constant	Valeur variante Nvelle règle	Unités
Émissions de particules	1,53 10^{-5}	2,9 10^{-5}	7,2 10^{-5}	7,2 10^{-5}	1,1 10^{-5}	incidences de maladies/MWh $_{th}$
Changement climatique	12,3	12,6	13,3	12,3	12,3	kg CO_2 éq./MWh $_{th}$
Acidification de l'air	0,36	0,66	0,57	1,55	0,3	moles H+ éq./MWh $_{th}$

Analyse relative à l'augmentation de la performance énergétique de la chaufferie

Cette analyse est réalisée en comparaison avec le scénario 2 « Chaufferie alimentée par des plaquettes forestières humides d'une puissance de 0,5 à 5 MW ». Elle se rapporte à la mise en place d'une unité de condensation entrainant une augmentation de rendement considérée de 10 %.

D'après la figure et le tableau ci-dessous, il ressort que la mise en place d'une unité de condensation permet une réduction de la contribution aux enjeux environnementaux présentés de par l'amélioration du rendement thermique d'une chaufferie biomasse qui en résulte et qui permet ainsi de réduire les quantités de bois consommées pour la même énergie délivrée.

À noter :

- que le cas présent se veut illustratif de l'influence que peut avoir la mise en place d'une unité de condensation car il est en général mis en œuvre sur des chaufferies de plus grosse puissance ;
- qu'il peut y avoir une dépollution des gaz de combustion résultant de la captation de poussières lors du changement d'état de la vapeur d'eau. Cette captation n'est pas systématiquement quantifiée et est fonction de la technologie de condensation mise en œuvre (par exemple par voie humide) et des technologies déjà en place (système de filtration, etc.…). Aucun abattement n'est considéré dans cette variante.

Il convient également de préciser que pour condenser les fumées de combustion du bois, la température de la « source froide » doit être comprise entre 47 °C et 63 °C selon l'humidité du bois et le niveau de maîtrise de la combustion. L'enjeu de la mise en place d'une unité de condensation résulte donc en la disponibilité de cette « source froide ». Cette source froide peut être disponible dans le cas de système de chauffage collectif pour des logements équipés de planchers chauffants.

Figure 29 : Influence de la mise en place d'une unité de condensation par rapport au scénario S2 utilisé en cas de base

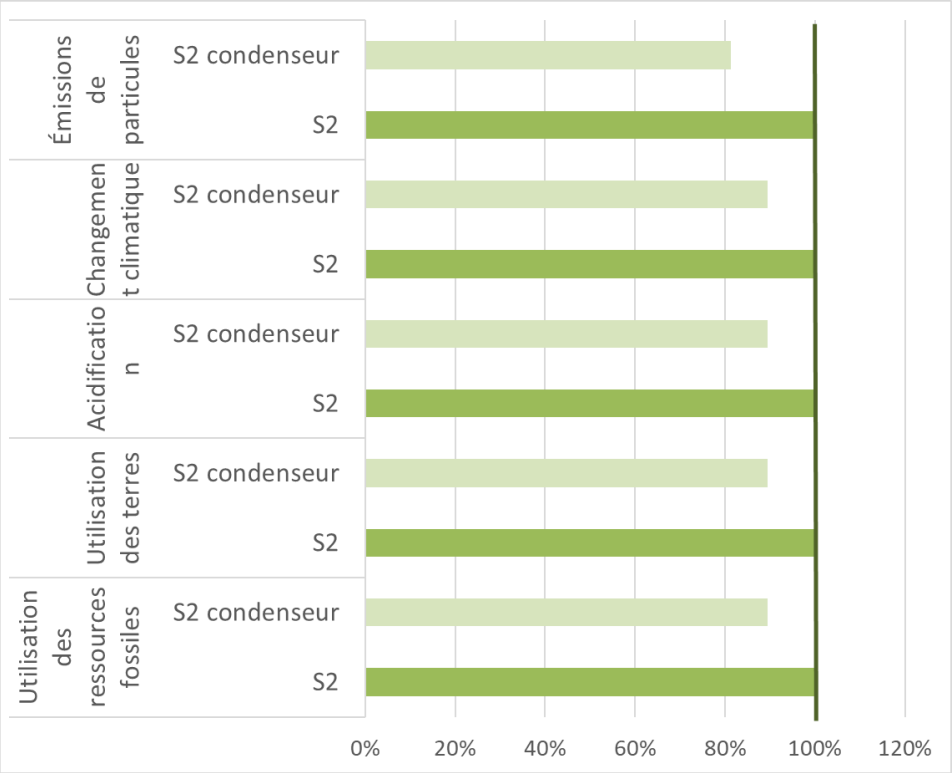


Tableau 82 : Influence de la mise en place d'une unité de condensation par rapport au scénario S2 utilisé en cas de base

Enjeux environnementaux	Valeur de base	Valeur variante condenseur	Unités
Émissions de particules	$1{,}53\ 10^{-5}$	$1{,}24\ 10^{-5}$	incidences de maladies/MWh $_{th}$
Changement climatique	12,3	11	kg CO_2 éq /MWh $_{th}$
Acidification de l'air	0,36	0,32	moles H+ éq./MWh $_{th}$
Utilisation des terres	33 240	29 740	points/MWh $_{th}$
Utilisation des ressources fossiles	500	447	MJ éq./MWh $_{th}$

Analyse relative à l'installation d'une chaufferie de puissance plus élevée

Cette analyse est réalisée en comparaison avec le scénario 3 « Chaufferie alimentée par des connexes de l'industrie de première transformation du bois (écorces ou chutes issues de scierie ou papeterie) utilisés directement sur le site d'une puissance de 5-50 MW ».

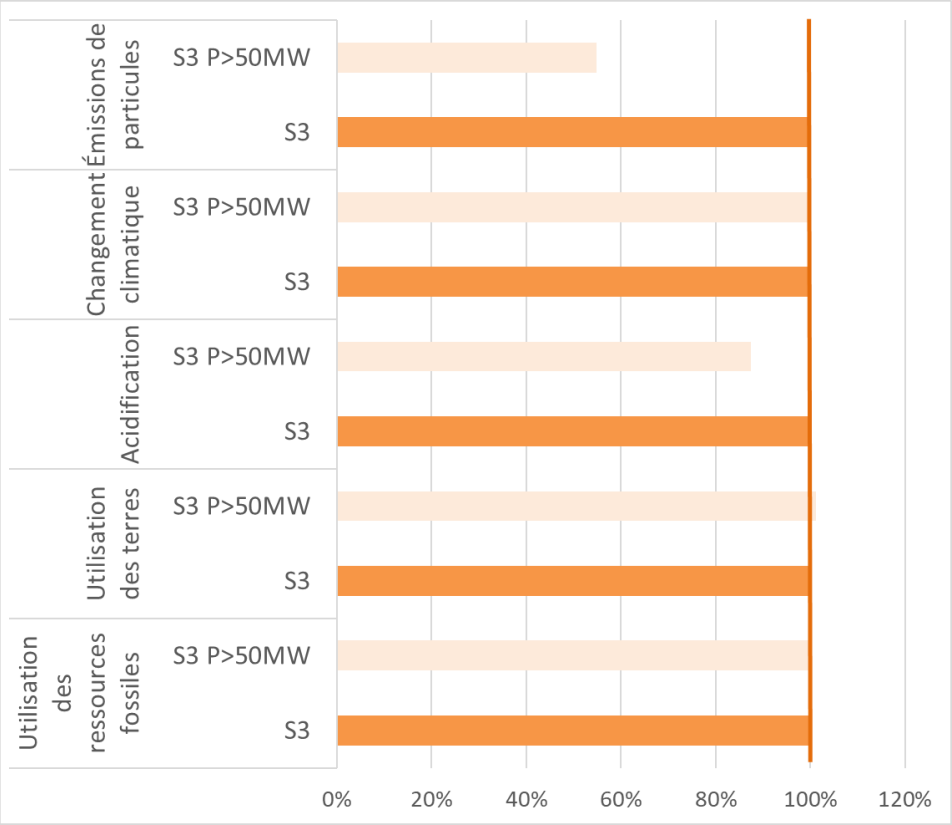
Sur base de la figure ci-dessous, il ressort que l'installation d'une chaufferie de puissance plus élevée (P > 50 MW) permet une réduction de la contribution aux enjeux environnementaux d'émission de particules et d'émission d'oxydes d'azote, du fait des exigences d'émission de ces polluants plus contraignantes pour des chaufferies de puissance supérieure.

Toutefois, une puissance plus élevée nécessite un approvisionnement plus conséquent en combustibles, dès lors la mise en œuvre d'une telle installation nécessite de vérifier l'adéquation entre la disponibilité des ressources en bois et les besoins d'une telle installation.

À noter qu'aucune autre influence que les exigences en termes d'émissions n'a été considérée.

Il convient de mentionner que les chaufferies de petites puissances représentent une part relativement élevée en termes de nombre de chaufferies en fonctionnement (~90 %) mais relativement faible en termes de quantité de chaleur produite (~5 %).

Figure 30 : Influence de l'augmentation de la puissance de la chaufferie par rapport au scénario S3 utilisé en cas de base



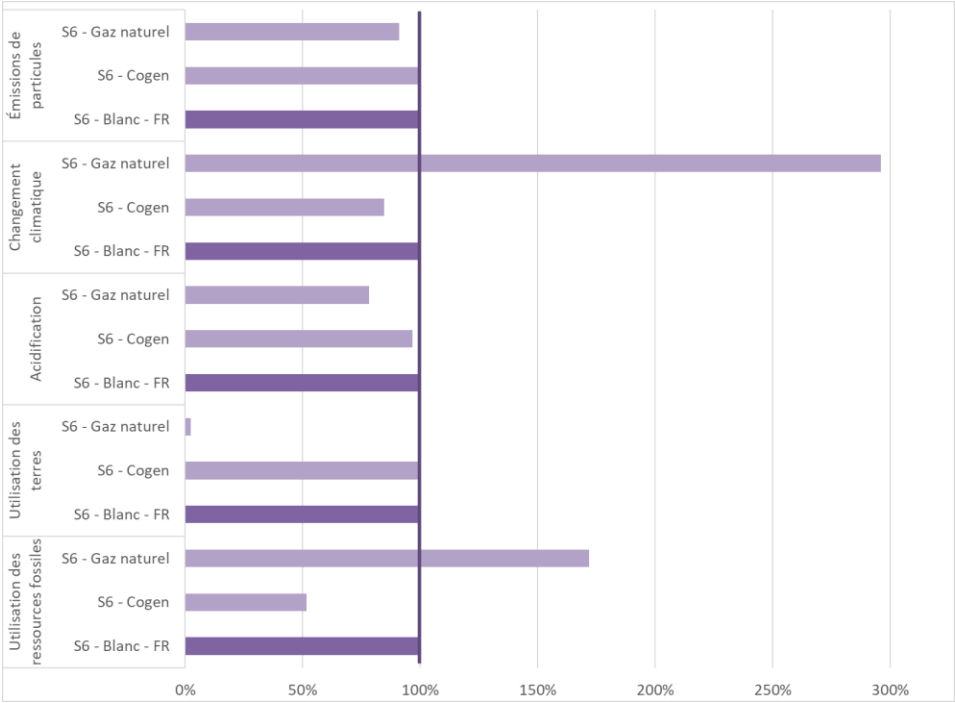
Analyse relative à l'utilisation de sources/principes différents pour le séchage des granulés

Cette analyse est réalisée en comparaison avec le scénario 6 « Chaufferie alimentée par des granulés issus de connexes d'une puissance de 0 à 0,5 MW ».

D'après la figure et le tableau ci-dessous, il ressort que la mise en place d'une unité de cogénération alimentée par de la biomasse (écorces et broyat de palettes) pour alimenter le séchage des granulés permet une réduction de la contribution à la plupart des enjeux environnementaux.

On observe aussi que l'utilisation de gaz naturel en lieu et place de biomasse pour alimenter le séchage des granulés permet une réduction de la contribution aux enjeux environnementaux utilisation des terres, acidification de l'air et émissions de particules d'une part, et une augmentation de la contribution aux enjeux environnementaux changement climatique et utilisation des ressources fossiles d'autre part.

Figure 31 : Influence de l'utilisation de sources ou de principes différents pour le séchage des granulés par rapport au scénario S6 utilisé en cas de base



Cogen : cogénération

Tableau 83 : Influence de l'utilisation de sources ou de principes différents pour le séchage des granulés par rapport au scénario S6 utilisé en cas de base

Enjeux environnementaux	Valeur de base	Valeur variante cogénération	Valeur variante Gaz	Unités
Émissions de particules	1,98 10^{-5}	1,97 10^{-5}	1,8 10^{-5}	incidences de maladies/MWh $_{th}$
Changement climatique	11,3	9,6	33,5	kg CO_2 éq./MWh $_{th}$
Acidification de l'air	0,26	0,25	0,2	moles H+ éq./MWh $_{th}$
Utilisation des terres	4 642	4 636	106	points/MWh $_{th}$
Utilisation des ressources fossiles	825	425	1418	MJ éq./MWh $_{th}$

5.4. Influence des choix méthodologiques réalisés sur le bilan environnemental

Affectation entre deux produits issus de l'exploitation forestière

Analyse centrée sur l'étape de gestion sylvicole

Le tableau ci-dessous reprend la hiérarchie entre les différentes filières d'approvisionnement de la biomasse au sein de chacun des 6 enjeux environnementaux étudiés dans le cadre de cette étude pour la production d'1 m³ de biomasse en sortie de forêt.

Pour la plupart des enjeux environnementaux étudiés, l'exploitation d'une futaie de feuillus ou de résineux présente une contribution largement diminuée en cas d'affectation économique (Eco) entre le BO et BIBE en lieu et place d'une affectation volumique (Vol). Pour rappel, les impacts de la gestion sylvicole sont alloués sur base des valeurs mentionnées dans le Tableau 54.

Tableau 84: Influence de l'affectation entre deux produits issus de l'exploitation forestière - Focus étape de gestion sylvicole uniquement - Hiérarchie

	Futaie résineux - MB	Futaie feuillus - MB	Futaie feuillus (Vol)	Futaie feuillus (Eco)	Taillis de feuillus	Futaie Douglas (Vol)	Futaie Douglas (Eco)	Transformation Taillis feuillus en Futaie résineux	Deprise agricole - TCR - Euca	Futaie résineux Souche
Changement climatique	3	4	5	1	6	7	2	7	9	8
Emissions de particules	3	3	3	1	4	5	2	5	5	6
Acidification de l'air	3	3	4	1	5	6	2	6	3	7
Eutrophisation terrestre	3	3	3	1	4	5	2	5	6	7
Utilisation des sols	2	1	10	4	9	7	5	8	6	3
Utilisation des ressources fossiles et nucléaires	3	4	5	1	6	7	2	8	9	9

Légende :
1 : filière la moins contributrice 4/5/6/8 : filière la plus contributrice

**Les menus bois et souches représentent actuellement une partie extrêmement faible des approvisionnements. Le potentiel de récolte additionnelle de ces compartiments n'est cependant pas négligeable.*

En appliquant une affectation économique en lieu et place d'une affectation volumique, les plaquettes forestières issues de l'exploitation d'une futaie de feuillus et l'exploitation d'une futaie de résineux deviennent, pour la plupart des enjeux environnementaux étudiés, les filières d'approvisionnement de la biomasse les plus avantageuses.

Le tableau ci-dessous présente l'influence du mode d'affectation de l'impact de la gestion sylvicole d'une futaie de feuillus ou de résineux entre deux produits : BO et BIBE.

Tableau 85: Influence de l'affectation entre deux produits issus de l'exploitation forestière - Focus étape de gestion sylvicole uniquement – Valeurs absolues

	Futaie résineux - MB	Futaie feuillus - MB	Futaie feuillus (Vol)	Futaie feuillus (Eco)	Taillis de feuillus	Futaie Douglas (Vol)	Futaie Douglas (Eco)	Transformation Taillis feuillus en Futaie résineux	Deprise agricole - TCR - Euca	Futaie résineux Souche
Changement climatique (kg éq CO2/m³)	4.3	4.7	6.2	0.7	7.8	10.4	2.6	10.8	18.1	15.6
Emissions de particules (incidence de maladie/m³)	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.2E-07	1.7E-06	2.6E-06	6.6E-07	2.7E-06	2.8E-06	4.1E-06
Acidification de l'air (moles H+/m³)	0.04	0.04	0.05	0.01	0.07	0.10	0.03	0.11	0.04	0.16
Eutrophisation terrestre (moles N/m³)	0.21	0.20	0.23	0.03	0.32	0.49	0.12	0.50	0.64	0.76
Utilisation des sols (point/m³)	11.0	5.4	83 917	9 231	69 216	42 889	10 722	47 879	29 938	37
Utilisation des ressources fossiles et nucléaires (MJ éq/m³)	62.6	70.7	98.6	10.8	122.4	154.0	38.5	161.2	225.8	227.1

Affectation d'une part de l'exploitation forestière aux granulés

Cette analyse est réalisée en comparaison avec le scénario 6 « Chaufferie alimentée par des granulés issus de connexes d'une puissance de 0 à 0,5 MW ». Dans ce cas de base, l'étape « Exploitation forestière » est entièrement affectée aux produits issus du sciage (100 %).

L'affectation d'une part de l'exploitation forestière aux granulés est réalisée sur base du taux d'écorce + taux de connexes à partir desquels sont réalisés les granulés à savoir 46 %. Les 54 % résiduels restent affectés aux produits du sciage tel que présenté au Tableau 56. D'après la figure et le tableau ci-dessous, il ressort que l'affectation d'une part de l'exploitation forestière aux granulés engendre :

- une faible augmentation pour les enjeux environnementaux pour lesquels la phase de gestion sylvicole était peu contributrice :
  - Émissions de particules : +2 %,
  - Changement climatique : +4 %,
  - Acidification : +10 % ;
- une augmentation plus conséquente pour les enjeux environnementaux pour lesquels la phase de gestion sylvicole était plus contributrice :
  - Utilisation des terres : +40 %,
  - Utilisation des ressources fossiles : +35 %.

Figure 32 : Influence de l'affectation d'une partie des impacts de l'amont forestier aux granulés par rapport au scénario S6 utilisé en cas de base

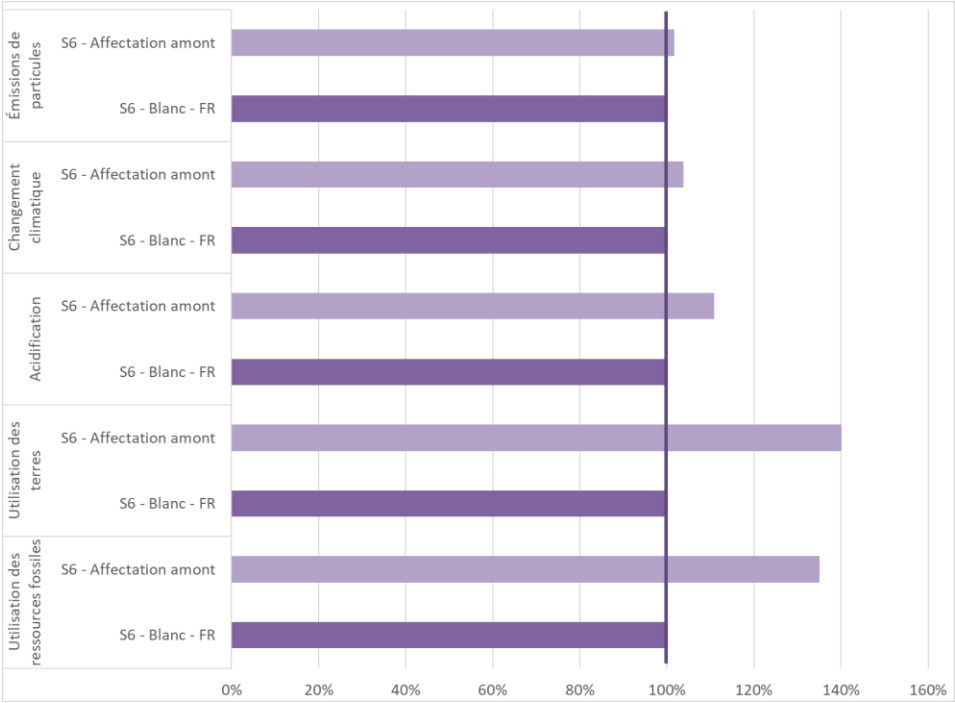


Tableau 86 : Influence de l'affectation d'une partie des impacts de l'amont forestier aux granulés par rapport au scénario S6 utilisé en cas de base

Enjeux environnementaux	Valeur de base	Valeur variante affectation amont	Unités
Émissions de particules	1,98 10^{-5}	2,01 10^{-5}	incidences de maladies/MWh $_{th}$
Changement climatique	11,3	11,75	kg CO_2 éq./MWh $_{th}$
Acidification de l'air	0,26	0,28	moles H+ éq./MWh $_{th}$
Utilisation des terres	4 642	6 500	points/MWh $_{th}$
Utilisation des ressources fossiles	825	1 113	MJ éq./MWh $_{th}$

5.5. Analyse comparative de l'utilisation de plaquettes forestières pour alimenter différents types de chaufferie

Le tableau ci-dessous reprend la contribution des différentes utilisations de plaquettes forestières pour la production de chaleur dans différents types de chaufferie pour les enjeux environnementaux étudiés dans le cadre de cette étude à savoir :

- S7 : Utilisation de plaquettes forestières humides afin de produire de la chaleur dans une chaufferie collective d'une puissance de 5-20 MW.
- S8 : Utilisation de plaquettes forestières humides afin de produire de la chaleur dans une chaufferie alimentant un process industriel d'une puissance de 5-50MW.
- S9 : Utilisation de plaquettes forestières humides afin de produire de la chaleur dans une unité de cogénération d'une puissance de 0,5-3 MWé.

Les 3 filières se différencient entre elles sur la base du :

- rendement, avec 85 % chaleur pour S7 et S8, contre 47,5 % chaleur et 20 % électricité pour S9 ;
- type de traitement des fumées et donc des consommables associés, avec un système SNCR pour S7.

Pour la plupart des enjeux environnementaux étudiés, la production de chaleur dans une unité de cogénération (S9) engendre des contributions plus élevées que les deux autres modes de production (S7 et S8).

Pour établir cette hiérarchie, la production d'électricité conjointe à la chaleur est soustraite au système étudié (élargissement des frontières du système) sur la base du mix de production moyen d'électricité en France.

Tableau 87 : Analyse comparative entre différents modes de production de chaleur

	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq/MWh th)	Utilisation des terres (points/MWh th)	Acidification (moles H+/MWh th)	Changement climatique (kg CO_2 éq. /MWh th)	Émissions de particules (incidences de maladie / MWh th)
S7	498	32 903	0,34	11,8	1,35E-05
S8	500	33 240	0,31	12,6	1,37E-05
S9	734	51 370	0,48	19,4	2,11E-05

Le mode d'affectation de la production conjointe de chaleur et d'électricité dans une unité de cogénération engendre des différences notables dans le bilan environnemental tel que présenté dans la figure ci-dessous. L'affectation suivant le contenu énergétique engendre une baisse de contribution aux différents enjeux de 40 à 50 %. Le scénario 9 relatif à l'utilisation de plaquettes forestières dans une unité de cogénération engendre des impacts similaires aux scénarios 7 et 8.

Figure 33 : Influence du mode d'affectation utilisé pour résoudre la multifonctionnalité lors d'une production conjointe de chaleur et d'électricité (élargissement des frontières du système vs. contenu énergétique)

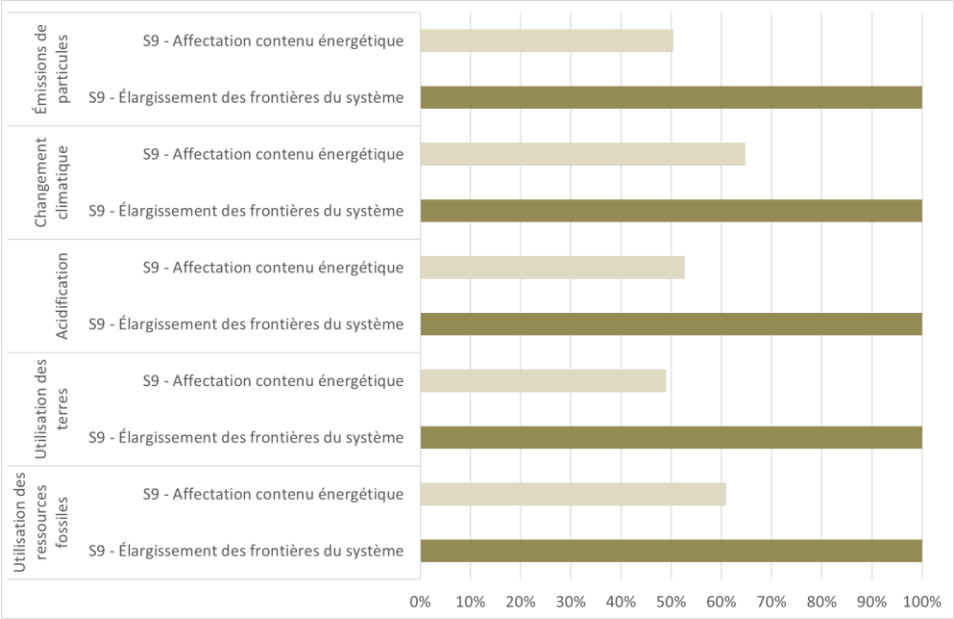


Tableau 88 : Influence du mode d'affectation utilisé pour résoudre la multifonctionnalité lors d'une production conjointe de chaleur et d'électricité (élargissement des frontières du système vs. contenu énergétique) – Valeurs absolues

	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq/MWh th)	Utilisation des terres (points/MWh th)	Acidification (moles H+/MWh th)	Changement climatique (kg CO_2 éq. /MWh th)	Émissions de particules (incidences de maladie / MWh th)
S9 – Elargissement des frontières du système	734	51 370	0,48	19,4	2.11E-05
S9 – Affectation du contenu énergétique	447	25 179	0,25	12,3	1.06E-05

5.6. Mise en perspective des filières bois énergie les unes par rapport aux autres

5.6.1. Préambule

La comparaison des différentes filières bois énergie est délicate étant donné :

- les différents usages auxquels elles se réfèrent[124] :
  - besoins climatiques (chauffage de bâtiments résidentiels / tertiaires et de locaux d'entreprises),
  - processus industriels ;
- les différences en termes de puissance à délivrer ;
- la variabilité de la production et des différentes sources de biomasse suivant la localisation géographique en France métropolitaine ;
- l'utilisation de données d'émissions majoritairement spécifiques aux installations (à leurs puissances) plutôt qu'aux types de combustibles utilisés.

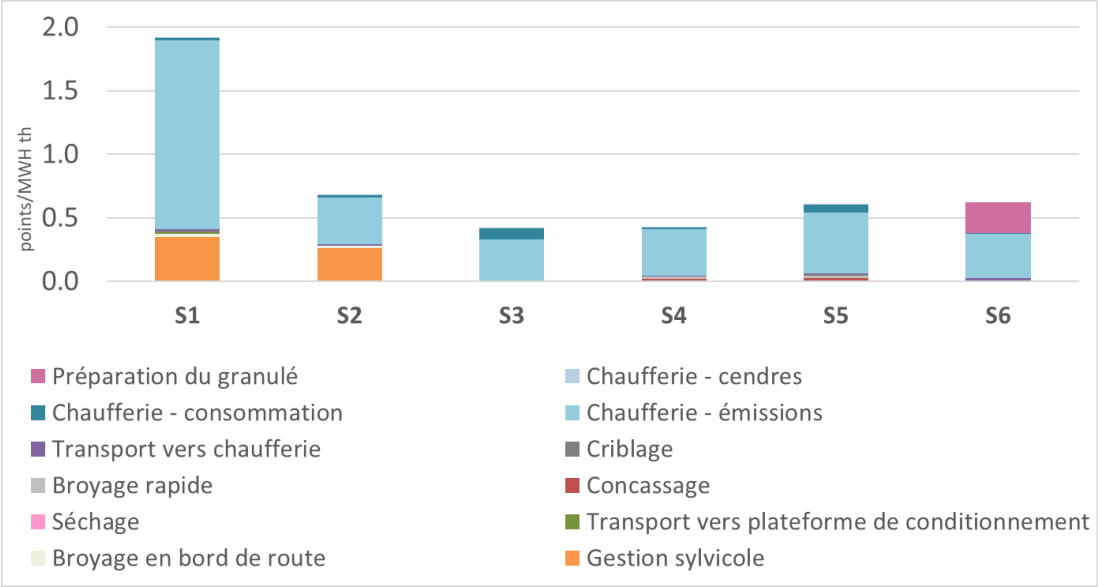
L'analyse réalisée dans cette section vise à aider le lecteur de ce rapport à appréhender les différences de contribution aux différents enjeux environnementaux entre filières bois énergie.

L'enjeu « Eutrophisation terrestre » n'est pas présenté en détails étant donné que le principal flux contributeur est l'oxyde d'azote qui est lui-même le principal flux contributeur pour l'enjeu « Acidification de l'air », qui est lui présenté en détails.

5.6.2. Au regard de l'empreinte environnementale totale

Au regard de l'empreinte environnementale totale, il apparait que les émissions issues de la combustion de la biomasse en chaufferie sont particulièrement discriminantes entre les filières bois énergie.

Figure 34 : Contribution des différentes filières bois énergie à l'empreinte environnementale totale (en points/MWh$_{PCI}$) – Répartition par étape du cycle de vie

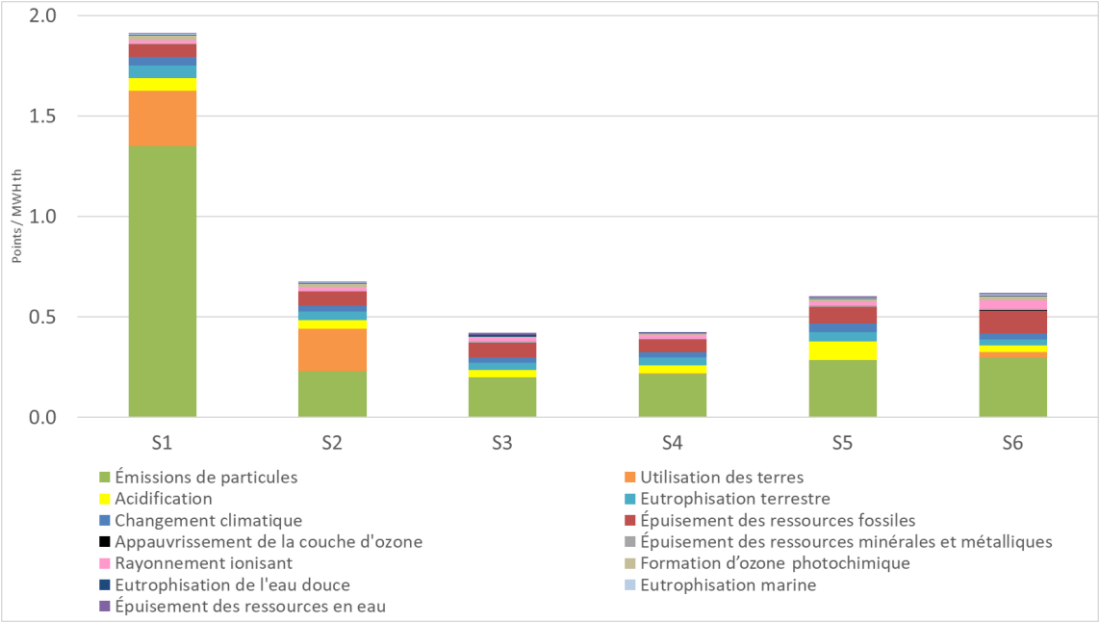


ATTENTION ! Conformément à la suite de normes ISO 14040-14044, aucune comparaison entre les filières bois énergie n'est réalisée et ne peut être réalisée par le lecteur sur base de l'empreinte environnementale totale qui résulte d'une étape de normalisation et pondération.

Au sein de ces émissions issues de la combustion en chaufferie, les émissions de particules présentent la plus grosse part contributive telle que présenté à la figure ci-dessous.

[124] L'étude complète étudie également un usage en cogénération. Ces résultats sont disponibles dans le rapport complet de l'étude, et n'ont pas été transcris dans cette synthèse.

Figure 35 : Contribution des différentes filières bois énergie à l'empreinte environnementale totale (en points/MWh$_{PCI}$) – Répartition par enjeu environnemental

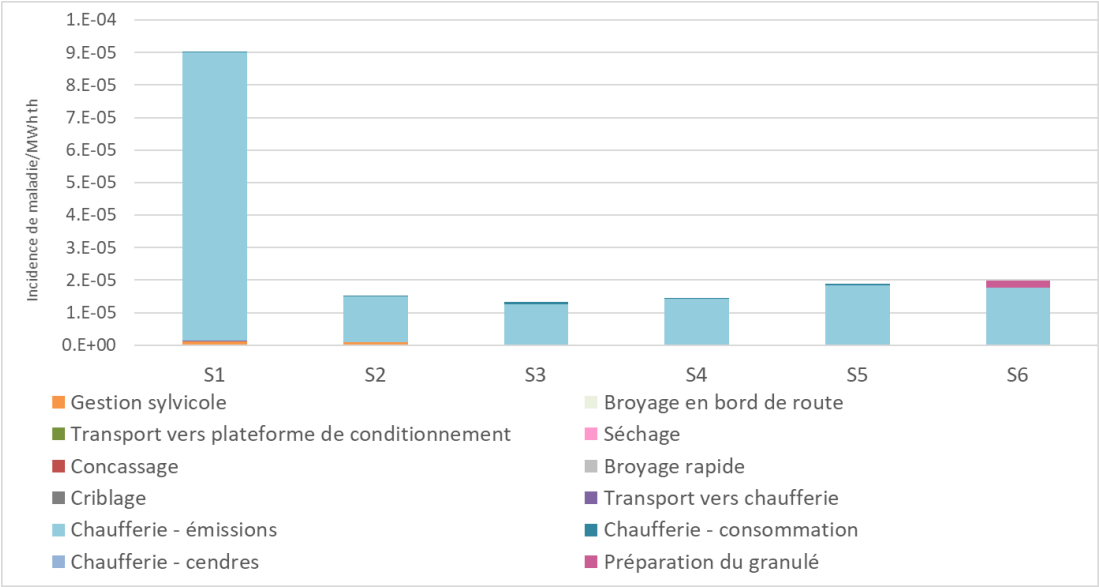


ATTENTION ! Conformément à la suite de normes ISO 14040-14044, aucune comparaison entre les filières bois énergie n'est réalisée et ne peut être réalisée par le lecteur sur base de l'empreinte environnementale totale qui résulte d'une étape de normalisation et pondération.

5.6.3. Au regard des émissions de particules

En ce qui concerne la contribution à l'émission de particules dans l'air (figure ci-dessous), les chaufferies ne disposant pas de systèmes d'abattement des émissions (électrofiltre et filtre à manche) sont très désavantagées de par le taux de poussières émises (S1 vs. S2). Il s'agit en général de chaufferies de faible puissance (0–0,5 MW pour S1 vs. 0,5–5 MW pour S2).

Figure 36 : Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « émissions de poussières » et la production d'1 MWh$_{PCI}$ (exprimée en incidences de maladie)



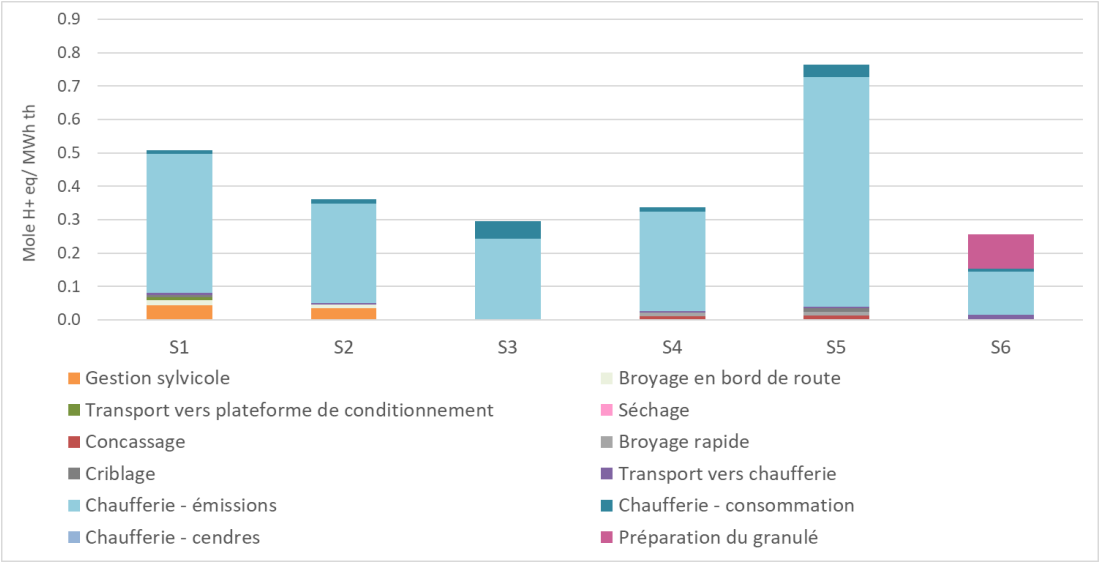
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Émissions de particules – incidences de maladie/MWh$_{th}$	9,0 E-05	1,5 E-05	1,3 E-05	1,45 E-05	1,9 E-05	2,0 E-05

Il convient de mentionner que les chaufferies de petites puissances représentent une part relativement élevée en termes de nombre de chaufferies en fonctionnement (~90 %) mais relativement faible en termes de quantité de chaleur produite (~5 %).

5.6.4. Au regard de la contribution à l'acidification

En ce qui concerne la contribution à l'acidification de l'air, les chaufferies disposant de systèmes de réduction primaires (foyer bas NO_x) ou secondaires (SNCR) des émissions d'oxydes d'azote (S3) sont avantagées par rapport à celles n'en disposant pas (S2). Il s'agit généralement de chaufferies de plus grosse puissance utilisées pour des processus industriels. L'utilisation de déchets de bois adjuvanté (S5) pour alimenter une chaufferie présente une contribution plus élevée à l'indicateur acidification de l'air de par la composition plus riche en souffre considérée pour ceux-ci.

Figure 37 : Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « acidification de l'air » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en moles H+ éq.)



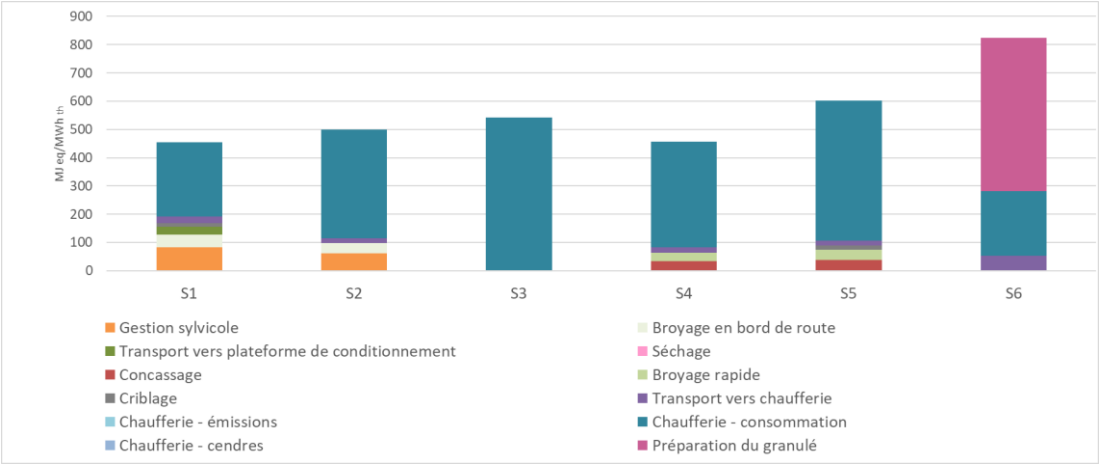
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Acidification de l'air – moles H+/MWh_{th}	0,51	0,36	0,30	0,34	0,76	0,26

5.6.5. Au regard de l'utilisation de ressources fossiles et nucléaires

Les éléments les plus discriminants entre filières pour l'utilisation de ressources fossiles et nucléaires sont :

- le fonctionnement de la chaufferie et plus spécifiquement le type de traitement des émissions mis en œuvre de même que la consommation de réactifs associée (**en turquoise**) ;
- le type de biomasse utilisée et notamment s'il s'agit de biomasse issue directement de l'exploitation forestière telle que des plaquettes ou non (**en orange**) ;
- Le type de préparation des différents combustibles (tel que présenté **en rose** pour les granulés).

Figure 38 : Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « utilisation de ressources fossiles et nucléaires » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en MJ éq.)



	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Utilisation de ressources fossiles et nucléaires – MJ éq/MWh_{th}	455	500	540	456	602	824

5.6.6. Au regard de l'utilisation de terres

L'élément le plus discriminant entre filières pour l'utilisation de terres est le type de biomasse utilisée et notamment s'il s'agit de biomasse issue directement de l'exploitation forestière telle que des plaquettes et si ces plaquettes sont produites à partir de menus bois et souches. Ainsi, les filières bois énergie dont la biomasse utilisée est issue de l'industrie de transformation ou de biens en bois en fin de vie mobilisent moins de surface forestière (S3, S4, S5 et S6). Dans cette section, seuls sont présentés les résultats relatifs aux scénarios S1 et S2.

L'affectation de l'utilisation des sols au bois récolté lors de l'exploitation forestière est réalisée sur la base de la formule suivante : *Aire occupée par la forêt (m^2) * temps d'occupation (année).*

L'aire occupée par la forêt sur une année est déterminée sur la base de la récolte en m^3/ha et de la durée d'une rotation en année.

Lors du développement de l'inventaire relatif à l'étape de gestion sylvicole, l'hypothèse faite est que l'occupation des sols est allouée à 100 % à la fonction de production de bois et non aux autres fonctions de la forêt (chasse, cueillettes, promenade, etc.), bien que malgré la récolte du bois ces autres fonctions de la forêt restent maintenues.

À partir de ce flux, un indicateur d'impact appelé « LANCA adapté par le JRC » est calculé dans le cadre du jeu d'indicateurs recommandé par la Commission européenne dans le cadre du Product Environmental Footprint.

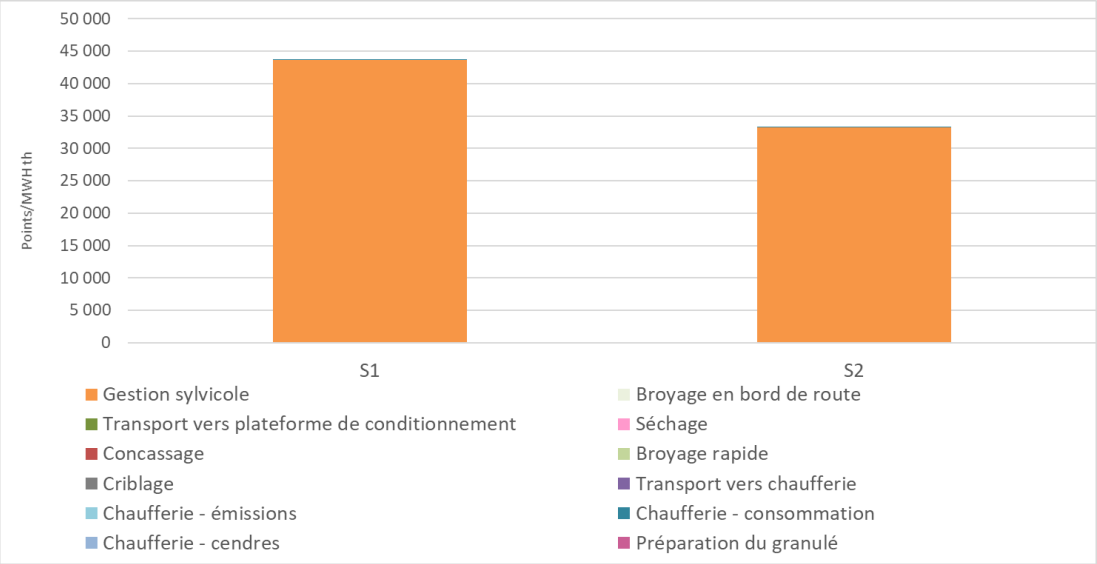
L'indicateur « LANCA adapté par le JRC » amalgame plusieurs sous-indicateurs existants au sein de la méthode LANCA de base :

- Résistance à l'érosion LANCA (en kg/m^2a) : quantité de sol érodée en plus de l'érosion naturelle par an à cause de l'occupation du terrain.
- Filtration mécanique du sol LANCA (en m^3/m^2a) : volume d'eau ne pouvant pas être absorbé par an à cause de l'occupation du terrain.
- Réalimentation des nappes souterraines LANCA (en m^3/m^2a) : volume d'eau n'ayant pas pu être naturellement régénéré à cause de l'occupation du terrain.
- Production biotique LANCA (en kg/m^2a) : quantité de biomasse non produite pendant une année à cause de l'occupation du terrain.

Ces quatre sous-indicateurs ont ensuite été rééchelonnés par le JRC par rapport à leur valeur moyenne et leur contribution respective a été iso pondérée (0,25 : 0,25 : 0,25 : 0,25) pour créer l'indicateur « LANCA adapté par le JRC » exprimé en points.

L'indicateur associe à cette aire annuelle occupée est un facteur de caractérisation exprimé en points/m^2a. Ce facteur représente la différence de qualité entre une situation de référence (forêt primaire) et la situation d'occupation (taillis de feuillus ou autre).

Figure 39 : Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « utilisation de terres » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en points)



5.6.7. Au regard de la contribution au changement climatique

Le type de biomasse mobilisée, et par conséquent la gestion sylvicole associée ou non, est un élément de différenciation entre filières pour la contribution au changement climatique, via la combustion de ressources fossiles utilisées lors de la gestion sylvicole (Figure 40 et Figure 41).

En effet, la contribution de l'étape de gestion sylvicole peut être de 15 à 30 %, pour les filières bois énergie utilisant des plaquettes forestières (S1 et S2), tel que présenté en orange sur les figures ci-dessous. Cette contribution provient des étapes de débardage et d'exploitation forestière.

La contribution au changement climatique est présentée de deux façons ci-dessous :

- Bilan GES global (intégrant carbone fossile et biogénique) avec une comptabilité totale des absorptions/émissions de CO_2 biogéniques (Figure 40). Les absorptions de CO_2 sont égales aux émissions de CO_2 biogéniques (issues de la combustion ou la dégradation du bois lors du séchage) et donc les émissions de CO_2 biogéniques s'annulent.
- Sans représenter les émissions biogéniques de CO_2 lors de la combustion et dégradation du bois car considérées neutres en carbone (Figure 41).

Comme on le voit sur les Figure 40 et Figure 41, les contributions de dioxyde de carbone biogénique (captation et émission) sont d'un ordre de grandeur supérieures aux émissions fossiles.

Figure 40 : Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « changement climatique » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en kg éq CO_2) – Bilan GES global avec comptabilité totale absorptions/émissions biogéniques.

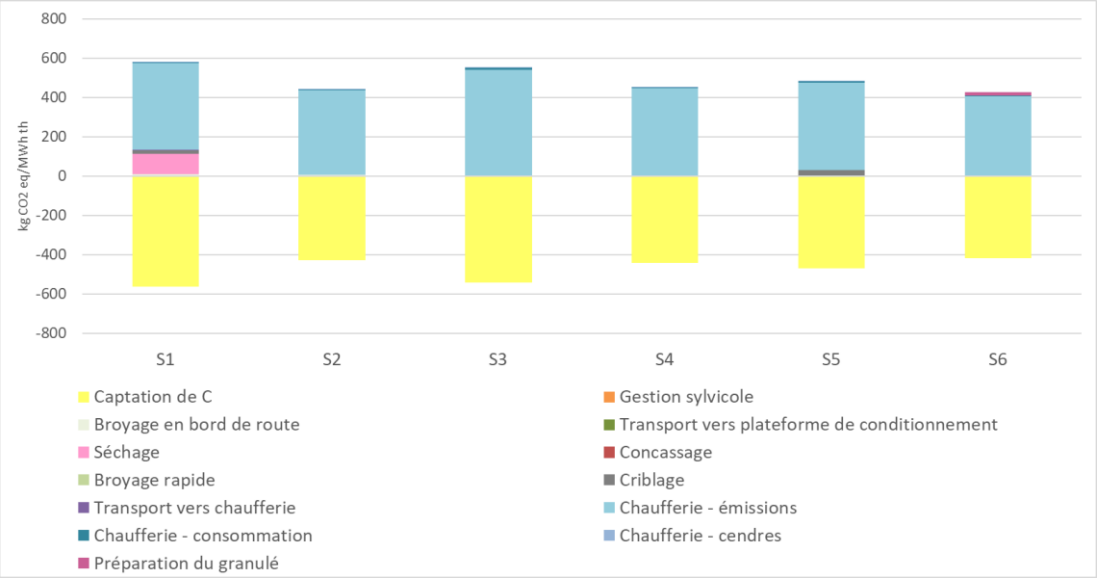
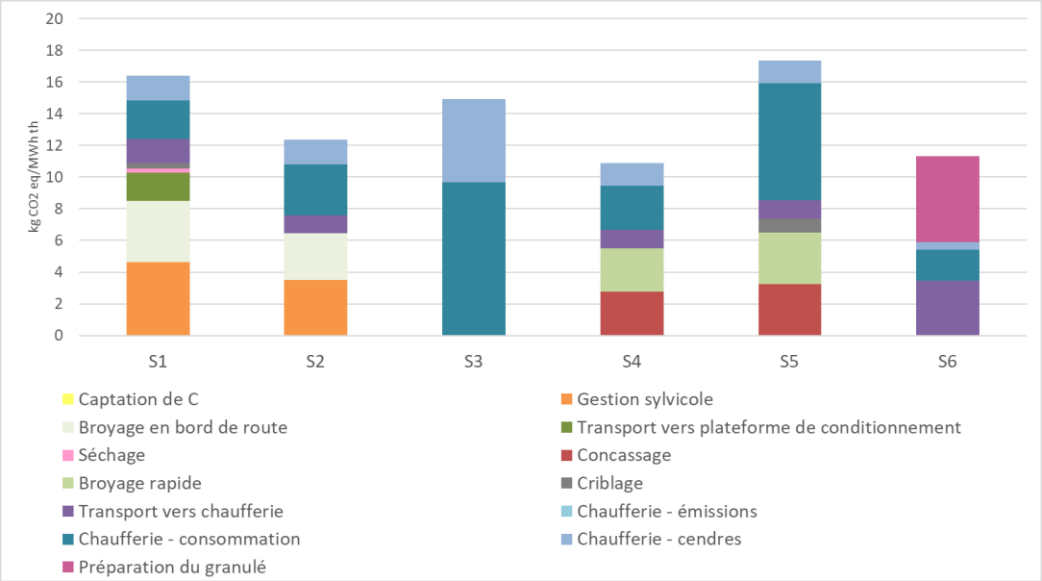


Figure 41 : Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « changement climatique » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en kg éq CO_2) –Neutralité C



À noter que les cendres enfouies sont considérées comme se dégradant partiellement (5 % du carbone contenu) en CO_2 ou CH_4 lors de l'enfouissement.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Changement climatique – kg éq CO_2/MWh_{th}	16,4	12,3	14,9	10.9	17.4	11,3

6. Limites et besoins de recherches complémentaires

Cette étude constitue un premier pas, qui en appellent d'autres afin d'affiner la compréhension des enjeux traités.

Limite/besoin 1 : **Le développement de la filière bois énergie peut conduire à une modification des pratiques sylvicoles ayant une influence sur la qualité des écosystèmes et les sols forestiers. Cette influence n'est pas quantifiée dans le cadre de cette étude.**

Le projet GERBOISE a permis certaines avancées sur l'influence de la filière bois énergie sur les enjeux environnementaux suivants[125]:

- la fertilité minérale des sols ;
- la biodiversité ;
- le tassement des sols ;
- l'érosion des sols ;
- la préservation des eaux et zones humides en forêt.

Cependant, la méthode d'analyse du cycle de vie ne permet actuellement pas de prendre en compte de manière quantitative ces avancées de façon robuste dans l'évaluation.

La partie 2 qui suit s'intéresse à évaluer les impacts des modifications des pratiques sylvicoles sur les stocks et puits de carbone en forêt.

Limite/besoin 2: **Les résultats concernant les scénarios de récolte de menus bois et souches doivent être pris en compte avec précaution.**

En effet, les menus bois et souches représentent actuellement une part faible des approvisionnements des filières bois énergie.

La filière bois énergie telle qu'étudiée dans ce cas mobilise des compartiments de bois jusqu'alors laissés en forêt. Ces éléments ont une teneur élevée en éléments minéraux, influençant par conséquent la fertilité minérale des sols et par ailleurs offrant un abri à de multiples organismes qui concourent au bon fonctionnement de l'écosystème.

Cette influence n'est pas considérée dans le cadre de cette étude. De même, dans l'analyse réalisée, il est à noter que les menus bois et souches sont considérés comme un résidu de la sylviculture et que par conséquent aucun impact de l'exploitation forestière n'est alloué à ce compartiment de bois récolté. Ces points devront être revus si l'accroissement de la collecte des menus bois et souches souhaitent être encouragés.

Limite/besoin 3: **L'indicateur de catégorie d'impact « utilisation des sols » n'est pas totalement adapté au cas spécifique des systèmes forestiers.**

L'indicateur « LANCA adapté par le JRC » amalgame plusieurs sous-indicateurs existants au sein de la méthode LANCA de base :

- **Résistance à l'érosion LANCA** (en kg/m²a) : quantité de sol érodée en plus de l'érosion naturelle par an à cause de l'occupation du terrain.
- **Filtration mécanique du sol LANCA** (en m³/m²a) : volume d'eau ne pouvant pas être absorbé par an à cause de l'occupation du terrain.
- **Réalimentation des nappes souterraines LANCA** (en m³/m²a) : volume d'eau n'ayant pas pu être naturellement régénéré à cause de l'occupation du terrain.
- **Production biotique LANCA** (en kg/m²a) : quantité de biomasse non produite pendant une année à cause de l'occupation du terrain.

Il conviendrait d'analyser plus en détail comment la méthode LANCA prend en compte les spécificités des systèmes forestiers et de la récolte de bois. Il est à noter que l'association européenne de producteurs de pâte et de papier finance actuellement une étude permettant d'adapter l'indicateur LANCA à la forêt.

Limite/besoin 4 : **Seules les émissions des deux GES suivants, le CO2 et CO, sont considérées à la chaufferie.**

[125] Voir le projet GERBOISE (https://www.ademe.fr/gerboise-gestion-raisonnee-recolte-bois-energie) pour plus d'information sur ces enjeux.

Les éventuels autres gaz à effet de serre pouvant être émis lors de la combustion (par exemple du CH_4 et N_2O) ne sont pas considérés.

Limite/besoin 5 : Les chaufferies ont souvent un approvisionnement multi-sources de biomasse.

Contrairement à la modélisation réalisée dans le cadre de cette étude, les chaufferies présentent dans la plupart des cas un approvisionnement multi-sources plutôt que mono-source.

Limite/besoin 6 : L'analyse déployée dans ces travaux ne peut pas se positionner sur l'intérêt de développer la filière bois énergie par rapport à d'autres filières de production de chaleur.

L'analyse déroulée dans le cadre de ce rapport ne vise pas à se prononcer en faveur du développement de la filière bois énergie ou d'une filière en particulier au sein de celle-ci. C'est pourquoi, les conséquences sur d'autres systèmes qui pourraient être modifiés par un fort développement du bois énergie collectif et industriel n'ont pas été évaluées dans le cadre de ce rapport.

Les autres systèmes potentiellement influencés sont :

- Bois matériau :

  Une éventuelle évolution des parts de marché du bois issu des forêts pour un usage matériau sur le marché des matériaux de construction. Le bois matériau pourrait venir en substitution à des produits tels que le béton.
- Panneaux de bois ou papier :

  Une éventuelle concurrence entre les débouchés bois énergie et l'industrie des panneaux de bois ou du papier.
- Bois énergie consommé par les particuliers :

  Les implications éventuelles des nouvelles installations bois énergie sur les consommations de bois énergie des particuliers.

Cette prise en compte impliquerait d'autres modèles, de nature économique, et des réflexions plus « macro » que les approches mises en œuvre dans le cadre de ces travaux.

7. Conclusions

7.1. Enjeux environnementaux pertinents pour les filières bois énergie

Conclusion 1 : **Parmi les enjeux environnementaux étudiés dans le cadre de cette étude et en appliquant la méthode de normalisation/pondération du projet européen PEF, les enjeux les plus pertinents pour les filières bois énergie étudiées sont :**

- **la contribution aux émissions de particules ;**
- **l'utilisation des terres ;**
- **la contribution à l'acidification de l'air via l'émission de substances acidifiantes ;**
- **la contribution à l'eutrophisation terrestre via l'émission de substances eutrophisantes ;**
- **la contribution au changement climatique via l'émission de gaz à effet de serre ;**
- **l'utilisation des ressources fossiles (et nucléaires).**

Au sein de l'empreinte environnementale totale déterminée sur base de la méthode de normalisation/pondération du projet européen PEF, l'enjeu environnemental prépondérant pour l'ensemble des filières bois énergie est la contribution aux émissions de particules.

Émissions de particules	30-70 % des contributions
Utilisation des terres	2-30 % des contributions
Acidification de l'air	2-12 % des contributions
Eutrophisation terrestre	2-12 % des contributions
Changement climatique*	2-8 % des contributions
Utilisation des ressources fossiles (et nucléaires)	2-20 % des contributions

* En considérant la neutralité carbone des émissions de combustion et dégradation du bois.[126]

7.2. Étapes les plus contributrices aux enjeux environnementaux des filières bois énergie

Légende pour les conclusions ci-dessous : +++ : fortement contributeur (>80 %) ++ : moyennement contributeur (10 %<x<80 %)
+ : faiblement contributeur (<10 %) Cellule vide : non contributeur

Conclusion 2 : **Les contributions aux enjeux environnementaux pour les filières bois énergie utilisant des plaquettes forestières (S1 et S2) ont principalement lieu lors de la gestion sylvicole et lors de l'exploitation de la chaufferie.**

Gestion sylvicole

+++ Au sein de la gestion sylvicole, étant donné que seuls la récolte et le débardage sont considérés, ce sont ces deux sous-étapes qui contribuent et cela de manière relativement équivalente.

\+ *Préparation*

\+ *Transport vers la chaufferie*

Exploitation de la chaufferie

+++ Au cours de l'exploitation de la chaufferie, les principales contributions résultent des émissions lors de la combustion et des consommations d'énergie nécessaires au bon fonctionnement.

Conclusion 3 : **Les étapes les plus contributrices aux enjeux environnementaux pour les filières bois énergie utilisant des connexes (S3) et des granulés issus de connexes (S6) ont principalement lieu lors de l'exploitation de la chaufferie.**

0 *Gestion sylvicole*

[126] L'hypothèse d'un équilibre global entre les émissions de CO_2 engendrées par la combustion du bois et les quantités de CO_2 absorbées lors de la croissance des arbres correspondant à ce bois consommé qui se traduit par une stabilité des stocks de carbone forestier.

+ Préparation
L'étape de préparation est particulièrement contributrice dans le cas des granulés.

\+ *Transport vers la chaufferie*

+++ Exploitation de la chaufferie
Au cours de l'exploitation de la chaufferie, les principales contributions résultent des émissions lors de la combustion et des consommations d'énergie nécessaires au bon fonctionnement.

Conclusion 4 : **Les étapes les plus contributrices aux enjeux environnementaux pour les filières bois énergie utilisant des déchets de bois issus de produits en fin de vie (S4 et S5) ont principalement lieu lors de l'exploitation de la chaufferie.**

0 *Gestion sylvicole*

+ Préparation
Lors de la préparation des combustibles, les principales étapes de préparation contributrices sont le broyage, le criblage et le concassage.

\+ *Transport vers la chaufferie*

+++ Exploitation de la chaufferie
Au cours de l'exploitation de la chaufferie, les principales contributions résultent des émissions lors de la combustion et des consommations d'énergie nécessaires au bon fonctionnement.

Conclusion 5 : Au regard des quatre enjeux environnementaux liés à la pollution de l'air, il apparait que :

- **les émissions à la chaufferie et la préparation du combustible dominent les contributions ;**
- **les principaux flux contributeurs sont les émissions de particules (PM) et les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) et pour les déchets de bois « adjuvanté » les émissions d'oxydes de soufre (SO_x).**

Tableau 89 : Flux élémentaires contributeurs et origines pour les différents enjeux environnementaux liés à la pollution de l'air.

	Origine des principales contributions	Flux élémentaires contributeurs (et % de contribution)					
		CO_2	PM	NO_x	CO	SO_x	NH_3
Changement climatique	Gestion sylvicole Préparation du combustible Consommation de la chaufferie	x			x		
Acidification de l'air	Combustion de la biomasse à la chaufferie			x > 75%		x	x
Eutrophisation terrestre	Combustion de la biomasse à la chaufferie			x > 99%			x
Émissions de particules	Combustion de la biomasse à la chaufferie		x > 98%	x < 1%		x	x

Note : par exemple, les NO_x produits par la combustion de la biomasse à la chaufferie contribuent à plus de 75 % à la valeur totale de l'indicateur acidification de l'air.

Conclusion 6 : **Au regard des deux enjeux environnementaux liés à l'utilisation des ressources, il apparait que :**

- **l'utilisation de surfaces forestières domine les contributions relatives à l'indicateur « utilisations des terres » ;**
- **les étapes d'exploitation forestière, de préparation des combustibles et les consommations lors de l'exploitation de la chaufferie dominent les contributions relatives à l'indicateur « utilisations des ressources fossiles ».**

Tableau 90 : Origines des contribution pour différents enjeux environnementaux et origines pour les différents enjeux environnementaux liés à l'utilisation des ressources.

	Origine des principales contributions
Utilisation des terres	Utilisation des sols forestiers pour la croissance des arbres
Utilisation des ressources fossiles (et nucléaires)	Exploitation forestière Préparation du combustible Consommation de la chaufferie

7.3. Pistes pour diminuer l'impact environnemental des filières bois énergie

Conclusion 7 : Il est recommandé de maintenir de faibles distances d'approvisionnement des combustibles.

Au regard des différents enjeux environnementaux étudiés, l'accroissement de la distance d'approvisionnement de la biomasse (plaquette forestière ou granulés) engendre une augmentation des impacts. L'accroissement des impacts est plus élevé pour les enjeux environnementaux sensibles aux transports tels que :

- les émissions de gaz à effet de serre du fait de la combustion de combustibles fossiles ;
- la consommation de ressources fossiles ;
- les émissions d'oxydes d'azote et de particules du fait de la combustion de ressources fossiles.

Conclusion 8 : La mise en place d'un traitement SNCR (technologie de traitement non catalytique sélective) présente un intérêt modéré de par des effets de transferts d'impacts entre enjeux environnementaux.

La mise en place d'un traitement SNCR engendre des transferts d'impacts entre enjeux environnementaux. Les transferts d'impacts se matérialisent par :

- une réduction de la contribution à l'acidification de l'air du fait de l'abattement des émissions de NO_x ;
- une augmentation de la contribution au changement climatique, aux émissions de particules et à l'utilisation de ressources fossiles, du fait du recours à l'ammoniac et aux fuites observées en émissions.

À noter que la mise en œuvre d'un SNCR nécessite un pilotage fin, et n'est pas réalisable sur des chaufferies à régime variable, telles que celles destinées à alimenter un réseau de chaleur, sous peine de voir les émissions d'ammoniac augmenter considérablement.

La réalisation d'une analyse plus poussée reste toutefois nécessaire pour dégager des conclusions sur le traitement SNCR dans le cas des chaufferies biomasse non connectées à un réseau de chaleur.

Conclusion 9 : Le respect de la nouvelle réglementation (directive 2015/2193 dite « Medium Combustion Plant ») en termes d'émissions de PM et de NO_x engendre une diminution de contribution.

Le respect de la nouvelle réglementation repose par exemple pour :

- les émissions d'oxydes d'azote, sur la conception différente des foyers de combustion avec la mise en œuvre de systèmes de réduction à la source tels que des foyers dimensionnés bas NO_x, avec une zone de combustion additionnelle par rapport à un foyer de combustion standard ;
- les émissions de poussières, sur une optimisation et une adéquation de la conception des systèmes d'électrofiltre et de filtre à manche (emplacement, configuration, type, etc.). En effet, ces deux systèmes de filtration permettent d'atteindre les VLE (valeur limite d'émission).

Les solutions dites « émergentes » restent des dérivés de ces systèmes. L'élément clé réside plutôt dans la qualité de l'exploitation des systèmes et du suivi nécessaire pour confirmer la bonne utilisation de ces filtres.

Conclusion 10 : La mise en place d'une unité de condensation présente un intérêt mais nécessite la disponibilité d'une « source froide ».

La mise en place d'une unité de condensation permet une réduction entre 10–20 % de la contribution aux impacts environnementaux de par :

- l'amélioration significative du rendement thermique qui en résulte et qui permet ainsi de réduire les quantités de bois consommées pour la même énergie délivrée ;
- la dépollution des gaz de combustion résultant de la captation de poussières lors du changement d'état de la vapeur d'eau.

Il convient cependant de préciser que pour condenser les fumées de combustion du bois, la température de la « source froide » doit être comprise entre 47 °C et 63 °C selon l'humidité du bois et le niveau de maîtrise de la combustion.

L'enjeu de la mise en place d'une unité de condensation résulte donc en la disponibilité de cette « source froide ». Elle peut être disponible dans le cas d'un système de chauffage collectif pour des logements équipés de planchers chauffants. Ce n'est pas un levier environnemental pertinent pour des chaufferies de petites puissances (< 0,5 MW). Ces systèmes ne sont en effet pas adaptés à des chaufferies de petite puissance.

7.4. Influence des choix méthodologiques sur le bilan environnemental

Conclusion 11 : **Le mode d'affectation en cas de multifonctionnalité influence de manière non négligeable le bilan environnemental des filières concernées.**

Les différents modes d'affectation en cas de multifonctionnalité peuvent engendrer une modification du bilan environnemental. Il est donc nécessaire d'avoir bien en tête les choix réalisés dans le cadre de l'étude. C'est par exemple le cas pour les filières de gestion sylvicole dont la hiérarchie change en fonction de l'affectation volumique ou économique réalisée entre les différents produits issus de la forêt (BO/BIBE) ou le type d'utilisation de plaquettes forestières pour alimenter différents types de chaufferie.

7.5. Différences de contribution aux différents enjeux environnementaux entre les différentes filières bois énergie

Conclusion 12 : **La comparaison entre les différentes filières bois énergie sur la base de l'exercice réalisé est délicate.**

La comparaison des différentes filières bois énergie est délicate étant donné :

- les différents usages auxquels elles se réfèrent[127] :
  - besoins climatiques (chauffage de bâtiments résidentiels / tertiaires et de locaux d'entreprises),
  - processus industriels ;
- les différences en termes de puissance à délivrer ;
- la variabilité de la production et des différentes sources de biomasse suivant la localisation géographique en France métropolitaine ;
- l'utilisation de données d'émissions majoritairement spécifiques aux installations (à leurs puissances) plutôt qu'aux types de combustibles utilisés.

Conclusion 13 : **Les bonnes performances relatives aux émissions de polluants atmosphériques des chaufferies de puissance comprises entre 1 et 50 MW mettent en avant l'intérêt de technologies mises en œuvre dans ces installations.**

En ce qui concerne la contribution à l'émission de particules dans l'air, les chaufferies ne disposant pas de systèmes d'abattement des émissions (électrofiltre et filtre à manche) sont très désavantagées de par le taux de poussières émises (S1 vs. S2). Il s'agit en général de chaufferies de faible puissance (0–0,5 MW pour S1 vs. 0,5–5 MW pour S2).

En ce qui concerne la contribution à l'acidification de l'air, les chaufferies disposant de systèmes de réduction primaires (foyer bas NOx) ou secondaires (SNCR) des émissions d'oxydes d'azote (S3) sont avantagées par rapport à celles n'en disposant pas (S2). Il s'agit généralement de chaufferies de plus grosse puissance utilisées pour des processus industriels. L'utilisation de déchets de bois adjuvanté (S5) pour alimenter une chaufferie présente une contribution plus élevée à l'indicateur acidification de l'air de par la composition plus riche en souffre considérée pour ceux-ci.

[127] L'étude complète étudie également un usage en cogénération. Ces résultats sont disponibles dans le rapport complet de l'étude, et n'ont pas été transcris dans cette synthèse.

Conclusion 14 : **Au regard de la contribution au changement climatique, il apparait que différentes étapes des filières bois énergie sont discriminantes entre celles-ci.**

Les étapes discriminantes sont :

- le type de biomasse utilisée et notamment s'il s'agit de biomasse issue directement de l'exploitation forestière telle que des plaquettes ;
- la préparation du combustible et plus particulièrement le nombre d'étapes de préparation et la nature de celles-ci ;
- le fonctionnement de la chaufferie et spécifiquement le type de traitement des émissions mis en œuvre de même que la consommation de réactifs associée.

Conclusion 15 : **Au regard de l'utilisation des ressources fossiles, il apparait que différentes étapes des filières bois énergie sont discriminantes entre celles-ci.**

Les étapes discriminantes sont :

- le type de biomasse utilisée et notamment s'il s'agit de biomasse issue directement de l'exploitation forestière telle que des plaquettes ;
- le fonctionnement de la chaufferie et spécifiquement le type de traitement des émissions mis en œuvre de même que la consommation de réactifs associée ;
- la préparation du combustible et plus particulièrement le nombre d'étapes de préparation et la nature de celles-ci.

Conclusion 16 : **Le type de biomasse mobilisée pour la production des plaquettes forestières a une influence pour certains enjeux environnementaux.**

Des variantes concernant le type de sylviculture et donc de biomasse mobilisée pour la production de plaquettes forestières ont été étudiées pour le S2 (taillis feuillus sur les figures ci-dessous). Lorsque l'on regarde l'ensemble du cycle de vie, la gestion sylvicole, représente respectivement entre 20–45 % de la contribution au changement climatique et entre 10–30 % de l'utilisation des ressources fossiles et nucléaires. Suivant les filières d'approvisionnement de la biomasse, le résultat de l'évaluation pour ces deux indicateurs peut varier de façon significative. Ainsi, les scénarios de TCR et d'utilisation des souches ont une contribution au changement climatique plus élevée. Pour les TCR, cela peut s'expliquer par une étape de sylviculture intégrant des étapes de plantation et de fertilisation. Pour l'utilisation des souches, cela peut s'expliquer par l'étape de récolte des souches qui est plus énergivore, et un taux de cendres plus élevé impliquant une gestion plus conséquente.

PARTIE 2 : EVALUATION ENVIRONNEMENTALE COMPARATIVE DE LA PRODUCTION DE CHALEUR A PARTIR DE BOIS ET DE GAZ NATUREL

1. Champ et objectifs de l'évaluation

L'établissement d'un scénario relatif aux énergies fossiles doit permettre de définir dans quelles conditions la production de chaleur pour alimenter un réseau de chaleur en chaufferie biomasse (S7 de la partie 1 qui se rapporte à la même filière d'approvisionnement que celle du scénario 2) présente un intérêt environnemental par rapport à la production en chaufferie alimentée par du gaz naturel.

2. Méthodologie d'évaluation environnementale

L'évaluation environnementale réalisée dans le cadre de cette étude est basée sur l'analyse du cycle de vie (ACV).

2.1. Description de la méthodologie d'analyse du cycle de vie

La méthodologie est identique à celle décrite au paragraphe 2.1 de la partie 1 page 26.

2.2. Unité fonctionnelle

L'ACV est une approche relative car les résultats sont toujours exprimés en fonction d'une **unité fonctionnelle**.

Toutes les analyses réalisées au cours de l'étude dépendront donc de celle-ci. L'unité fonctionnelle définit les fonctions du système étudié et la performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie.

L'unité fonctionnelle définie pour cette partie est la suivante :

> Produire 1 MWh_{th} d'énergie en sortie d'un système de production de chaleur en vue d'alimenter un réseau de chaleur.

Fonction(s) assurée(s) / service(s) rendu(s) : « quoi »	**Produire de l'énergie en sortie d'un système de production de chaleur*.**
Ampleur de la fonction ou du service : « combien »	Un mégawattheure thermique d'énergie .
Niveau de qualité souhaité : « comment »	De la croissance de la biomasse à la production d'énergie en sortie de chaufferie (avant distribution sur le réseau). De l'extraction du gaz naturel à la production d'énergie en sortie de chaufferie (avant distribution sur le réseau).
Durée d'usage du produit : « combien de temps »	*Non pertinent*[128]

2.3. Frontières des systèmes étudiés

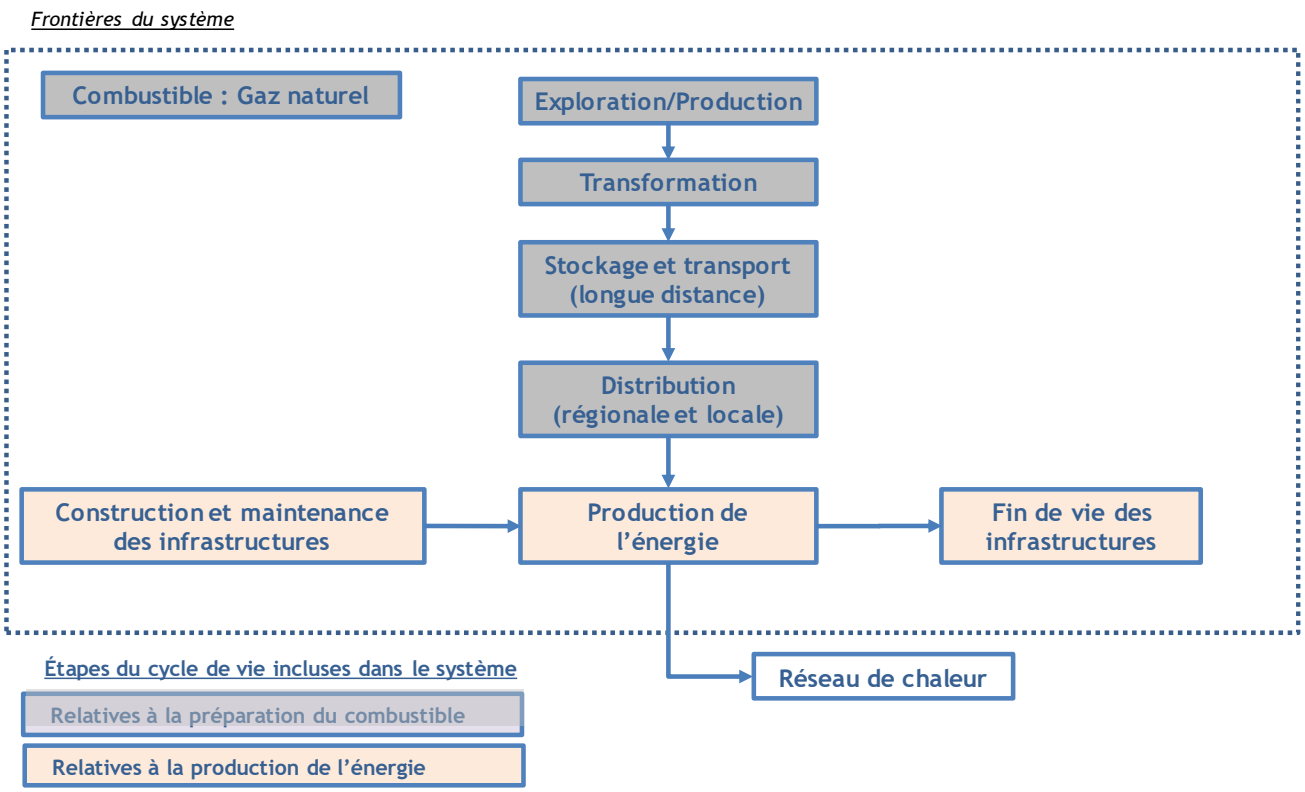
Les périmètres pris en compte dans l'étude pour chaque type de combustible sont présentés ci-dessous.

- Le Tableau 12 page 30 décrit les étapes du cycle de vie prise en compte pour le scénario biomasse (S7) ;
- La Figure 42 ci-dessous décrit le périmètre du scénario « énergie fossile » et les étapes du cycle de vie sont décrites de manière plus détaillée dans le Tableau 91.

[128] Critère destiné dans la pratique ACV au produit à longue durée de vie

Dans le cadre de cette étude, nous nous arrêtons à la fourniture de la chaleur à l'entrée du réseau de chaleur[129]. Le réseau de chaleur utilisé pour la distribution est donc exclu de l'analyse pour l'ensemble des combustibles étudiés.

Figure 42 : Périmètre de l'étude pour les énergies fossiles (S10)[35]



[129] Un réseau de chaleur (ou réseau de chauffage urbain) est un système de distribution de chaleur à partir d'une installation de production centralisée et à destination de plusieurs consommateurs. La chaleur est transportée au sein d'un ensemble de canalisations, généralement à l'échelle d'un quartier.

Tableau 91 : Description des étapes du cycle de vie étudiées – Énergie fossile

Étapes du cycle de vie			Processus inclus	Processus exclus
Exploration			Identification des puits Aménagement des puits	-
Production des matières premières	Production	Extraction	Consommation d'énergie Émissions fugitives Consommation de substances chimiques Combustion du gaz Infrastructures	-
		Liquéfaction	Consommation d'énergie Émissions fugitives Combustion du gaz Infrastructures	-
	Transport	Transport avec gazoduc	Consommation d'énergie Fuites Infrastructures	-
		Transport par bateaux	Consommation de fuel Émissions fugitives	-
Distribution	Conditionnement avant mise sur le réseau	Gazéification	Consommation d'énergie Émissions fugitives Infrastructures	-
		Stockage	Consommation d'énergie Émissions fugitives Infrastructures	-
	Distribution sur le réseau	Distribution & réseau	Consommation d'énergie Émissions fugitives	-
Utilisation	Combustion	Combustion en chaufferie	Émissions atmosphériques	-
		Traitement des émissions	Production des réactifs nécessaires au traitement	-
		Consommation d'énergie pour le fonctionnement	Consommation d'électricité	-
		Infrastructures	Production des infrastructures Fin de vie des infrastructures	Maintenance
Distribution via un réseau de chaleur				

2.4. Enjeux environnementaux

Les enjeux environnementaux et la méthodologie associée à ceux-ci sont identiques à ceux mentionnés au paragraphe 2.4 de la partie 1 page 34.

2.5. Multifonctionnalité et problèmes d'affectation

L'approche est identique à celle mentionnée au paragraphe 2.5 de la partie 1 page 38.

2.6. Approche attributionnelle ou conséquentielle

L'approche est identique à celle mentionnée au paragraphe 2.6 de la partie 1 page 39.

2.7. Critères de coupure

L'approche est identique à celle mentionnée au paragraphe 2.7 de la partie 1 page 40.

2.8. Méthodologie suivie pour fiabiliser les résultats de l'évaluation environnementale

L'approche est identique à celle mentionnée au paragraphe 2.8 de la partie 1 page 40.

3. Données et hypothèses du scénario en cas de base et des variantes

3.1. Principe de collecte des données suivi

L'ensemble des données liées à la production de chaleur à partir de gaz naturel est issu de la littérature scientifique. Aucune donnée n'a été collectée directement auprès des acteurs de la filière.

3.2. Production du gaz naturel

3.2.1. Mix de provenance du gaz consommé en France

Cas de base

La France produit peu de gaz naturel et importe quasi l'intégralité du gaz consommé. Du gaz de mine, extrait du bassin du Nord-Pas-de-Calais, est toujours injecté dans le réseau en quantités toutefois marginales (100 gigawatt-heures (GWh)) et depuis 2012, du biométhane obtenu par épuration de biogaz est injecté dans les réseaux en quantités encore très faibles, mais qui doublent presque chaque année (714 GWh en 2018).

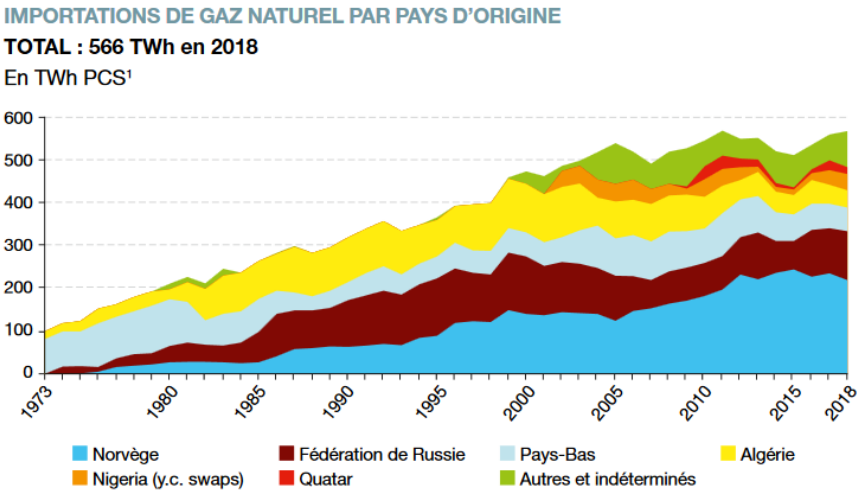
Il existe deux réseaux de distribution en France : un réseau de gaz dit pauvre (B, à plus faible pouvoir calorifique), en provenance des Pays-Bas et plus particulièrement de Groningen, et un réseau de gaz riche (H, à plus haut pouvoir calorifique) en provenance à la fois des Pays-Bas et d'autres pays. Le réseau de gaz dit pauvre concerne principalement le Nord de la France.

Les réseaux de distribution français sont alimentés par du gaz naturel importé :

- par gazoduc depuis la Norvège, les Pays-Bas et la Russie et autres pays européens ;
- par méthanier depuis le Qatar, le Nigeria et l'Algérie (GNL).

La figure ci-dessous présente les importations par pays d'origine.

Figure 43 : Provenance des importations de gaz naturel français (1973-2018) [source : Chiffres clés de l'énergie – Édition 2019 – MTES – CGDD - SDES]



¹ 1 TWh PCS = 1 milliard de kWh PCS en pouvoir calorifique supérieur (voir définitions).
Note : la Fédération de Russie correspond à l'URSS avant 1991.
Champ : France entière (y compris DOM).
***Source :** SDES, enquête annuelle sur la statistique gazière*

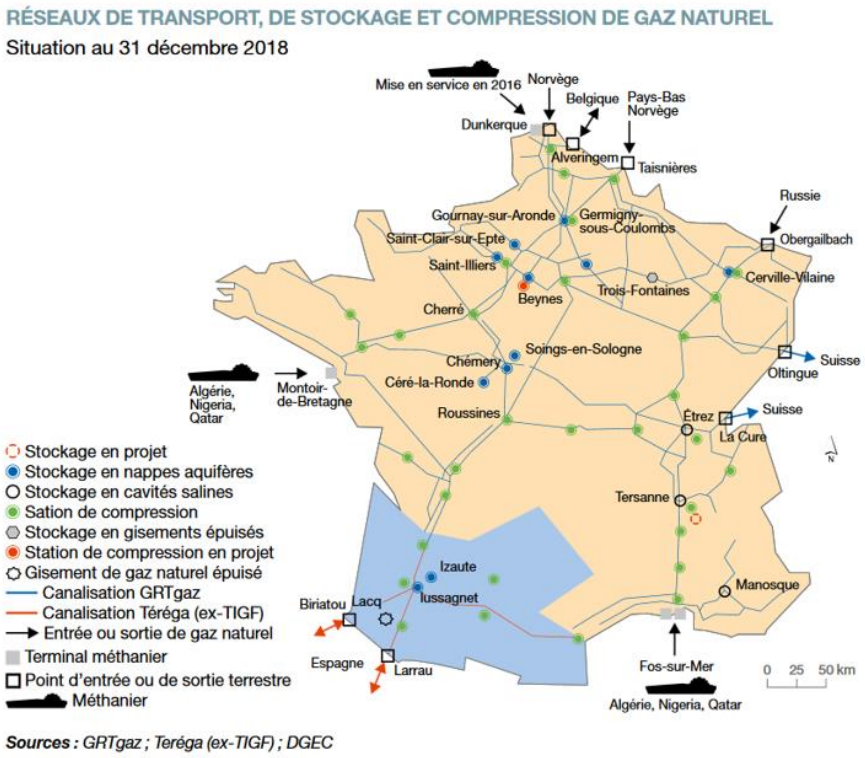
La répartition des importations par pays d'origine pour 2018 est présentée dans le tableau ci-dessous.

Pour le mix 2018, il est supposé que les importations « Autres » sont des importations de gaz russe et anglais.

Tableau 92 : Répartition des importations en France en 2018 [source : Chiffres clés de l'énergie – Édition 2019 – MTES – CGDD - SDES]

	Répartition des importations en 2018 - % sur base de TWh PCS	Répartition des importations en 2018 utilisée dans l'étude - %
Norvège	39 %	39 %
Russie	20 %	30 %
Pays-Bas	10 %	10 %
Nigéria	7 %	7 %
Algérie	7 %	7 %
Qatar	3 %	3 %
Royaume-Uni	-	4 %
Autres (achats sur les marchés du Nord-Ouest)	14 %	0 %

Figure 44 : Réseau de gaz français [source : Chiffres clés de l'énergie – Édition 2019 – MTES – CGDD - SDES]



Variante

Le mix gaz français est amené à fortement évoluer dans les 10 prochaines années, avec l'arrêt progressif des champs gaziers de Groningen (gaz pauvre B). Aucune livraison n'est garantie après 2029.

Dans le cadre de cette étude, nous proposons d'appliquer une variante sur le mix de provenance du gaz consommé en France. Cette variante se base sur base des projections pour l'Europe de l'IEA dans son World Energy Outlook (2019) pour 2030. L'IEA prévoit dans son *World Energy Outlook*[130] que :

- La demande en gaz en Europe décline (-9,4 % dans le scénario Sustainable Development) ou reste stable (-0,3 % dans le scénario New Policies) à horizon 2030.
- L'UE devrait baisser la part de sa production domestique dans la consommation de 29 % à 18 %.[131]
- Les importations de gaz naturel européennes augmentent de 16 % pour compenser la baisse de la production européenne. La production norvégienne devrait en effet baisser de 16 % sur la période et la production de l'UE (Pays-Bas notamment) baisser de 37 %.
    - ⇨ Nous considérons dans la variante que la provenance de gaz des Pays-Bas devient nulle (0 %).

[130] https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018/gas#abstract consulté le 16/04/2020
[131] World Energy Outlook - Outlook for natural gas figure 8.9 Natural gas balance of the European Union in the New Policies Scenario

- La Russie devrait rester sur le long-terme[132] la principale source de gaz dans l'Union Européenne en maintenant sa part dans les importations européennes à environ 40 %.
    - ⇨ Nous considérons dans la variante que la provenance de gaz russe atteint 40 %
- La Norvège en revanche diminue ses quantités exportées compte tenu de la baisse de production[133]. La proportion n'est pas précisée.
    - ⇨ Nous considérons dans la variante que la provenance de gaz norvégien baisse à 15 %
- Les quantités de GNL importées depuis les États-Unis devraient augmenter pour atteindre 10 % de l'approvisionnement. Seul le gaz conventionnel est considéré pour les États-Unis (le gaz de schiste n'est pas considéré).
- D'autres sources de GNL devraient être mobilisées (Qatar, Afrique) pour atteindre environ 25 % de l'approvisionnement en tout. La provenance des importations en GNL n'est pas spécifiée par l'IEA.
    - ⇨ Nous considérons dans la variante que la provenance de GNL augmente à 25 % en conservant la même quantité entre les pays de provenance que celle de 2018.
- En 2030, 18 % de l'approvisionnement européen provient de l'UE (dont Royaume-Uni) d'après l'IEA.
    - ⇨ Nous considérons dans la variante que la proportion en provenance du Royaume-Uni reste identique.
- Le reste de l'approvisionnement est assuré par pipeline par la région de la Mer Caspienne (Azerbaïdjan).

Tableau 93 : Scénario mix gaz naturel France 2030 retenu comme variante dans cette étude

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2"></th><th colspan="2">Cas de base</th><th colspan="2">Variante</th></tr>
<tr><th colspan="2">2018</th><th>Evolution par rapport à 2018</th><th colspan="2">2030</th></tr>
<tr><td colspan="2">Norvège</td><td colspan="2">39 %</td><td>-24 %</td><td colspan="2">15 %</td></tr>
<tr><td colspan="2">Russie</td><td colspan="2">30 %</td><td>+10 %</td><td colspan="2">40 %</td></tr>
<tr><td colspan="2">Pays-Bas</td><td colspan="2">10 %</td><td>-10 %</td><td colspan="2">0 %</td></tr>
<tr><td rowspan="3">GNL</td><td>Nigéria</td><td rowspan="3">17 %</td><td>7 %</td><td rowspan="3">+8 %</td><td rowspan="3">25 %</td><td>10 %</td></tr>
<tr><td>Algérie</td><td>7 %</td><td>10 %</td></tr>
<tr><td>Qatar</td><td>3 %</td><td>5 %</td></tr>
<tr><td colspan="2">États-Unis</td><td colspan="2">0 %</td><td>+10 %</td><td colspan="2">10 %</td></tr>
<tr><td colspan="2">Royaume-Uni</td><td colspan="2">4 %</td><td>0 %</td><td colspan="2">4 %</td></tr>
<tr><td colspan="2">Azerbaïdjan</td><td colspan="2">0 %</td><td>+6 %</td><td colspan="2">6 %</td></tr>
</table>

Place de l'injection de biométhane

Depuis 2012, du biométhane obtenu par épuration de biogaz est injecté dans les réseaux en quantités encore très faibles, mais qui doublent quasiment chaque année (714 GWh en 2018 soit l'équivalent de 0.001% des importations, contre 406 GWh en 2017). En fin d'année 2018, 76 installations, d'une capacité d'injection de 1 218 GWh/an, sont raccordées aux réseaux de gaz naturel, tandis que 661 projets supplémentaires, représentant une capacité de près de 14 TWh/ an, sont en cours de développement. L'augmentation d'injection de biométhane n'est pas prise en compte dans le mix 2030 en l'absence de données. Fin 2019, on était à 1 235 GWh de biométhane injecté dans les réseaux et une capacité d'injection (parc raccordé) de 2157 GWh/an (Panorama du gaz renouvelable au 31 décembre 2019).

3.2.2. Inventaire du cycle de vie du gaz naturel

Le cycle de vie de la production de gaz naturel peut être décomposé en deux parties[134] :

- L'**amont**, c'est-à-dire l'exploration, la production, le regroupement et la transformation du gaz. Ces émissions sont imputables au gaz distribué en France quel que soit le mode de distribution.
    - L'exploration comprend l'identification des puits et leur aménagement.
    - La production comprend l'étape d'extraction du gaz naturel du sous-sol.
    - La transformation du gaz consiste à retirer les impuretés du gaz naturel (vapeur, azote, gaz acides, hydrocarbures condensables, éthane, propane et butane, etc.) pour atteindre les spécifications nécessaires au transport.
      La transformation peut se faire directement sur le site de production ou dans des unités dédiées après un prétraitement et un transport de regroupement.

[132] https://www.iea.org/commentaries/a-long-term-view-of-natural-gas-security-in-the-european-union consulté le 16/04/2020
[133] Baisse d'environ 18 % d'après nos calculs
[134] Adapté de European Commission (2015) Study on actual GHG data for diesel, petrol, kerosene and natural gas

Cette étape comprend des émissions de gaz naturel par dégazage, des fuites et des émissions de CO_2 par torchage du gaz naturel dégazé lorsque les débits sont suffisants pour le fonctionnement d'une torchère.

- L'**aval**, c'est-à-dire l'éventuelle liquéfaction (puis regazéification), le transport international et la distribution finale du gaz à l'utilisateur.
  - Le transport international du gaz est celui sur de grandes distances, à haute pression, depuis les étapes de transformation jusqu'à l'entrée dans les réseaux de distribution.
    Le transport peut se faire soit par gazoduc (gaz), soit par transport maritime (à la suite d'une liquéfaction) avec, lors de l'arrivée à destination, une regazéification et ensuite une injection dans le réseau.
  - La liquéfaction consiste à porter le gaz à une température de -162 °C. Les hydrocarbures sont éliminés pendant le processus de liquéfaction.
  - La distribution du gaz est l'étape qui consiste à approvisionner les utilisateurs finaux en gaz via un réseau de distribution spécifique connecté aux gazoducs de transport longue-distance.

D'après les données de l'inventaire américain des émissions (EPA, 2019), les étapes majeures du cycle de vie en ce qui concerne les émissions de méthane sont la production, le regroupement et le transport et stockage. L'exploration, la transformation et la distribution contribuent relativement faiblement aux émissions de méthane d'après cet inventaire. Les émissions lors de l'étape de distribution sont toutefois dépendantes du réseau et des estimations plus élevées ont été fournies par d'autres sources.

Focus sur les fuites de méthane tout au long du cycle de vie

Le ratio de méthane relargué dans l'atmosphère est un paramètre essentiel dans le calcul des impacts du gaz naturel tout au long du cycle de vie.

Une analyse de publications récentes faisant état des fuites de méthane a été réalisée afin de remettre en question les données d'ecoinvent. L'objectif était de :

- détailler les fuites par étape du cycle de vie, depuis l'exploration jusqu'au consommateur final en France ;
- définir les valeurs de références utilisées pour le cas de base ;
- définir les fourchettes de valeur pour la variante.

Il existe deux types de méthodes pour estimer les fuites de méthane :

- Les méthodes dites « bottom-up » qui mesurent les fuites de méthane pour dériver un facteur d'émission.

  Ces estimations conduisent plutôt à sous-estimer les fuites de méthane (selon Howarth et al., 2019) car les mesures ne permettent pas de capter toutes les fuites.
- Les méthodes dites « top-down » qui mesurent la teneur en méthane dans l'atmosphère, puis l'attribuent partiellement à la production de gaz naturel.

  Ces méthodes nécessitent de poser un certain nombre d'hypothèses fortes pour déterminer la part des émissions mesurées imputable au gaz naturel.

<u>Cas de base</u>

Pour la modélisation des fuites de gaz dans le mix gaz 2018, les choix suivants sont effectués :

- Pour les fuites amont, les données retenues sont les ratios calculés par RDC à partir des fuites totales rapportées par l'outil Methane Tracker de l'IEA (en kt) et des données de production de gaz par pays de l'IEA les plus récentes (en unités énergétiques), converties en tonnes en prenant en compte un Hi de 55,53 MJ/kg pour le méthane.
- Pour les fuites aval, les données de l'étude de la Commission européenne de 2015[135] sont retenues en priorité sauf lorsqu'il n'y a pas de données (cf. tableau ci-dessous).

  Remarque **:** Les données de l'IEA Methane Tracker pour les fuites aval n'ont pas été retenues car il n'est pas possible de distinguer les fuites qui relèvent du transport international, de la liquéfaction et de la distribution locale.

Tableau 94 : Pourcentage de fuites de méthane par pays producteur – Cas de base

Pays	Amont (exploration, production, transformation)	Aval (transport international – hors distribution)	Total
Norvège	0,009 %	0,0022 %	**0,011 %**
Russie	1,21 %	1,77 %	**2,98 %**
Pays-Bas	0,01 %	0,028 %	**0,04 %**

[135] European Commission (2015) Study on actual GHG data for diesel, petrol, kerosene and natural gas

Qatar	0,30 %	0,05 %	**0,35 %**
Algérie			
Nigéria			
États-Unis	0,96 %	0,01 %	**0,97 %**
Royaume-Uni	0,20 %	0,02 %	**0,22 %**
Azerbaïdjan	0,39 %	0,50 %	**0,89 %**

Sources :
Amont : calculs RDC Environment sur base de IEA Methane tracker 2020
Aval : Commission européenne 2015 sauf Norvège qui provient de calculs RDC Environment sur base de IEA Methane tracker 2020
Remarque : Les données du Qatar sont retenues pour l'Algérie et le Nigeria.

Variante 1

Pour la modélisation des fuites dans le mix gaz prospectif 2030, les valeurs min et max de la littérature sont utilisées. Les valeurs sont issues de l'IEA Methane tracker 2020 qui relate :

- les valeurs min et max constatées dans la littérature ;
- les potentiels des mesures de réduction des émissions (avec coût supplémentaire ou sans coût supplémentaire[136]).

À chaque fois, la valeur la plus faible (scénario le plus optimiste) et la plus haute (scénario le plus pessimiste) sont sélectionnées parmi les données de l'IEA.

Tableau 95 : Pourcentage de fuites de méthane (total amont + aval hors distribution) étudiés en variante (IEA Methane tracker 2020)

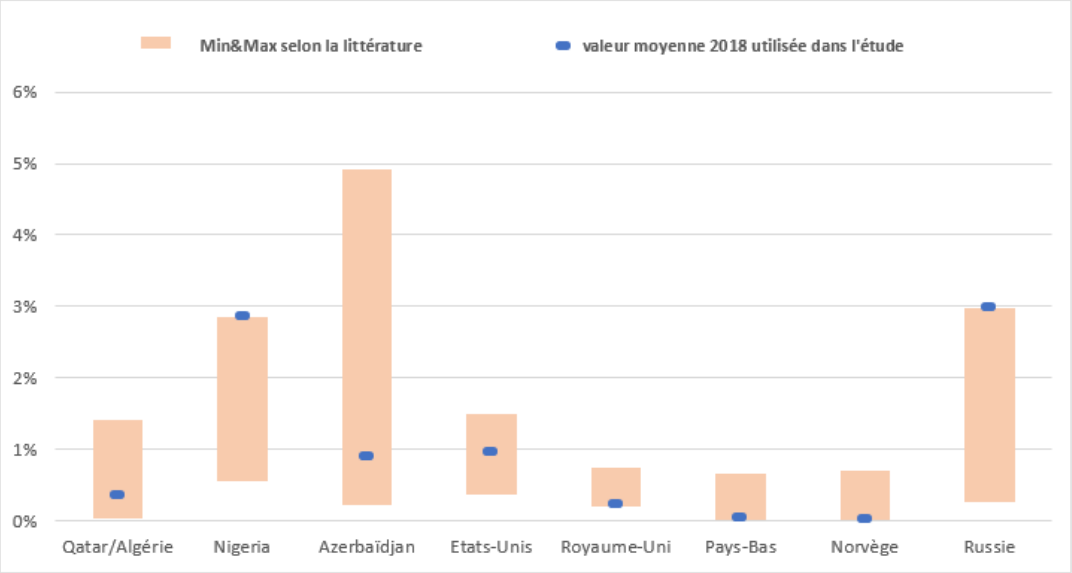
Pays	Valeur min	Valeur max
Norvège	0 %	0,71 %
Russie	0,26 %	2,38 %
Pays-Bas	0,01 %	0,65 %
Qatar	0,04 %	1,41 %
Algérie		
Nigéria		
États-Unis	0,37 %	1,50 %
Royaume-Uni	0,20 %	0,73 %
Azerbaïdjan	0,23 %	4,92 %

Remarque : Les données du Qatar sont retenues pour l'Algérie et le Nigeria étant donné qu'il s'agit de GNL arrivant par méthanier dans les 3 cas.

Les données présentées dans les deux tableaux précédents sont présentées dans la figure suivante :

[136] Les mesures de réductions des émissions (sans coûts) comprennent : détection des fuites et réparation, installation d'un système de récupération des vapeurs, remplacement de pièces des compresseurs (notamment des joints), etc.

Figure 45 : Valeurs moyennes du taux de fuite (amont et aval hors distribution) en 2018 et valeur min-max de la littérature étudiées comme variante



Remarque : Les données du Qatar sont retenues pour l'Algérie et le Nigeria.

Variante 2

Une seconde variante avec un pourcentage de fuites de méthane (total amont + aval hors distribution) de 0 à 5 % quel que soit le pays est considéré.

Exploration, Production, Transformation

Cette section recense les informations relatives aux étapes d'exploration, production, transformation et transport.

En base de modélisation, les inventaires de cycle de vie d'ecoinvent v3.5 suivants sont utilisés pour modéliser la production amont.

Tableau 96 : Inventaires du cycle de vie utilisés pour la production du gaz naturel (amont)

Pays d'origine	Inventaire de cycle de vie (ecoinvent v3.5)
Norvège	petroleum and gas production, off-shore, natural gas, high pressure [m³], NO, EI v3.5
Russie	natural gas production, natural gas, high pressure [m³], RU, EI v3.5
Pays-Bas	72% petroleum and gas production, on-shore, natural gas, high pressure [m³], NL, EI v3.5 28% petroleum and gas production, off-shore, natural gas, high pressure [m³], NL, EI v3.5
Qatar	petroleum and gas production, on-shore, natural gas, high pressure [m³], RoW, EI v3.5
Algérie	petroleum and gas production, on-shore, natural gas, high pressure [m³], RoW, EI v3.5
Nigéria	petroleum and gas production, on-shore, natural gas, high pressure [m³], RoW, EI v3.5
États-Unis	natural gas production, natural gas, high pressure [m³], US, EI v3.5
Royaume-Uni	petroleum and gas production, off-shore, natural gas, high pressure [m³], GB, EI v3.5
Azerbaïdjan	petroleum and gas production, off-shore, natural gas, high pressure [m³], RoW, EI v3.5

Remarque : Les données de fuites de méthane de ces inventaires sont adaptées sur la base de la section précédente intitulée « Focus sur les fuites de méthane tout au long du cycle de vie ». Cette adaptation retranche les valeurs de fuites déjà présentes dans les inventaires et les remplace par les valeurs présentées dans la section précédente.

Les inventaires incluent l'utilisation des sols pour les sites de production. Il est considéré que ceux-ci sont bâtis sur des champs/pâtures[137].

Transport international du gaz naturel

Le transport international est modélisé à l'aide des inventaires de cycle de vie suivants :

Tableau 97 : Inventaires du cycle de vie utilisés pour le transport international du gaz naturel (aval)

	Pays concernés	Distance moyenne parcourue	Inventaire de cycle de vie
Transport par pipeline	Norvège	1100 km	transport, pipeline, offshore, long distance, natural gas, NO, EI v3.5
	Royaume-Uni	750 km	
	Pays-Bas	700 km	transport, pipeline, long distance, natural gas, NL, EI v3.5
	Russie	6000 km (4 600 km en Russie et 1 400 en Europe)	Russie : transport, pipeline, offshore, long distance, natural gas, RU, EI v3.5 Europe : transport, pipeline, long distance, natural gas, RER, EI v3.5
	Azerbaïdjan	4000 km	transport, pipeline, long distance, natural gas, RoW, EI v3.5
Transport par méthanier	États-Unis	9000-10 000 km	market for transport, freight, sea, tanker for liquefied natural gas, ecoinvent v 3.6
	Qatar	8000-12 000 km	
	Algérie	1 000-2500 km	
	Nigéria	7 000 km	

Remarque : Les inventaires sont adaptés avec les taux de fuite de méthane indiqués dans la section précédente intitulée « Focus sur les fuites de méthane tout au long du cycle de vie ».

Les inventaires incluent l'énergie et le matériel utilisés lors de la phase de construction du pipeline de même que l'utilisation du sol. Il est considéré dans les inventaires que les pipelines sont situés à 90 % sur des sols agricoles et dans 10 % des cas sur des sols forestiers. L'utilisation de sols agricoles n'est pas affectée au pipeline mais uniquement au système de production agricole. Il est par ailleurs considéré que le sol ne fait pas l'objet d'une plantation forestière à l'issue de la période d'exploitation des pipelines.

La consommation d'énergie nécessaire au transport du gaz naturel par pipeline a été ajustée à partir des données de l'étude de la Commission européenne[138]. Il s'agit d'une autoconsommation (utilisation du gaz naturel circulant dans le réseau).

Tableau 98 : Consommation énergétique pour le transport du gaz via pipeline

Pays d'origine du gaz naturel	Consommation pour le transport
Norvège	0,00001 J/J.km
Pays-Bas	0,00003 J/J.km
Russie	0,000045 J/J.km
Azerbaïdjan	0,00003 J/J.km
Royaume-Uni	0,000015 J/J.km

Remarque : L'unité J/J.km correspond à une consommation d'énergie par joule d'énergie transportée sur un kilomètre.

Pour le transport international, les inventaires de cycle de vie de transport par pipeline ont donc été adaptés avec les distances et les valeurs de consommation pour le transport, afin de représenter au mieux le mix considéré.

Liquéfaction et regazéification du GNL

La liquéfaction du gaz naturel est modélisée à l'aide des données suivantes.

[137] L'affectation de l'utilisation des sols pour les sites de production au gaz naturel est réalisée sur la base de la formule suivante : Aire occupée par le site de production (m²) * temps d'occupation (année).
L'indicateur associe à cette aire annuelle occupée est un facteur de caractérisation exprimé en points/m²a. Ce facteur représente la différence de qualité entre une situation de référence (forêt primaire) et la situation d'occupation (site de production).
[138] Source : European Commission. (2015). Study on actual GHG data for diesel, petrol, kerosene and natural gas

Tableau 99 : Inventaires du cycle de vie pour la liquéfaction du gaz naturel

Paramètre	Valeur	Valeur convertie	Source	Inventaire de cycle de vie
Qatar, Algérie et Nigéria				
Gaz naturel (pour besoins énergétique et torchage)	7,5 GJ/t de gaz naturel	5,527 MJ/m³ de gaz naturel (sous forme gazeuse)[139]	Commission européenne 2015 (valeur retenue pour le Qatar)	natural gas, burned in gas motor, for storage; GLO, EI v3.5
Infrastructures	-	8,2056E-13	ecoinvent "natural gas production, liquefied, RME"	market for natural gas processing plant [GLO]
États-Unis				
Gaz naturel	5,475 GJ/t de gaz naturel	4,036 MJ/m³ de gaz naturel (sous forme gazeuse)[139]	Commission européenne 2015 (valeur retenue pour la Norvège)	natural gas, burned in gas motor, for storage; GLO, EI v3.5
Electricité	43,3 kWh/t gaz naturel	0,03 kWh/m³ de gaz naturel (sous forme gazeuse)		market group for electricity, low voltage, US, EI v3.5
Infrastructures	-	8,2056E-13	ecoinvent "natural gas production, liquefied, RME"	market for natural gas processing plant [GLO]

Remarque : Les données du Qatar sont retenues pour l'Algérie et le Nigeria.

Selon le rapport de la Commission européenne[140], la regazéification demande 0,2-0,5 % du volume de gaz naturel liquéfié. L'inventaire « natural gas, burned in gas motor, for storage; NL, EI v3.5 » est utilisé pour modéliser la combustion.

Note : Les inventaires « natural gas, burned in gas motor, for storage; EI v3.5 » sont utilisés pour représenter une consommation énergétique, à partir de gaz naturel, dans ecoinvent 3.5. C'est pourquoi ces inventaires ont été également retenus et utilisés dans le cadre de cette étude.

Distribution du gaz naturel en France

Selon le rapport de la Commission européenne de 2015[140], les pertes de méthane lors de la transmission et de la distribution sont respectivement de 0,038 % et 0,135 %.

Selon le rapport de la Commission européenne de 2015[140], la consommation énergétique pour le transport et la distribution du gaz naturel en France est de 0,000001 J/J.km. La distance moyenne parcourue en pipeline est de 322 km soit 0,00115 MJ/MJ de gaz naturel distribué.

Tableau 100 : Inventaires de cycle de vie retenus pour la distribution du gaz naturel en France

Paramètre	Inventaire de cycle de vie
Consommation d'énergie	natural gas, burned in gas motor, for storage; NL, EI v3.5
Réseau de distribution	transport, pipeline, long distance, natural gas - transport, pipeline, long distance, natural gas – NL, EI v3.5

Remarque : les émissions dans l'air (dues au fuites) de l'inventaire de cycle de vie pour la modélisation du transport par pipeline sont adaptées avec les données citées en ce début de chapitre.

Note : L'inventaire « natural gas, burned in gas motor, for storage, NL; EI v3.5 » est utilisé pour représenter une consommation énergétique, à partir de gaz naturel, dans ecoinvent 3.5. C'est pourquoi cet inventaire a également été retenu et utilisé dans le cadre de cette étude.

3.2.3. Combustion du gaz naturel en chaufferie

Émissions liées à la combustion

Deux méthodes peuvent être considérées pour déterminer les émissions atmosphériques :

- Méthode 1 : Utilisation des valeurs limites d'émissions (VLE), c'est-à-dire les seuils réglementaires.
- Méthode 2 : Utilisation des inventaires d'émissions nationaux.

[139] Sur base de IEA (Natural gas information 2018). PCS du GNL : 54,25 MJ/kg ou 40 MJ/m³ (sous forme gazeuse)
[140] European Commission (2015) Study on actual GHG data for diesel, petrol, kerosene and natural gas

Méthode 1 : Utilisation des VLE

La production d'1 MWh d'énergie est conditionnée par le rendement de la chaufferie et le PCI du combustible (*in fine* de la quantité de combustible à brûler).

Les émissions lors de la combustion sont déterminées sur base des VLE et du volume de fumées spécifique.

*Émissions atmosphériques = Volume des fumées sèches à 6 % de O_2 * Valeurs limites d'émissions (VLE - à 6 % de O_2 sur gaz secs)*

Les émissions atmosphériques propres à chaque scénario sont reprises dans le tableau suivant et proviennent de l'arrêté du 03/08/18 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration au titre de la rubrique 2910 (applicable à compter du 20 décembre 2018).

Tableau 101 : Combustion en chaufferie – Émissions atmosphériques sur base des valeurs limites d'émissions (VLE) (source : ICPE)

	Valeur	Flux élémentaire
Poussières (mg/Nm³)	0	-
SO_2 (mg/Nm³)	0	-
NO_x (mg/Nm³)	100	émissions de NO_x dans l'air : Nitrogen oxides, emissions to air, unspecified (kg)
CO (mg/Nm³)	100	émissions de CO dans l'air : carbon monoxide (biogenic), emissions to air, unspecified (kg)
Dioxines/furanes (ng/Nm³)	-	-
COVNM (mg/Nm³)	-	-
Substances organiques (mg/Nm³)	-	-
Chlorure d'hydrogène (mg/Nm³)	-	-
Fluorure d'hydrogène (mg/Nm³)	-	-
Ammoniac (mg/Nm³)	-	-
Rubrique ICPE	2910**	

*** ICPE 2910 : Combustion, à l'exclusion des installations visées par les rubriques 2770, 2771, 2971 ou 2931 (fait référence aux installations de combustion de la biomasse). Les VLE sont celles qui s'appliquent actuellement aux installations soumises à déclaration et mises en service entre le 1er janvier 2014 et le 20 décembre 2018, quelle que soit la puissance (supérieure à 1 MW toutefois). Arrêté du 3 août 2018.*

Méthode 2 : Utilisation des inventaires d'émission nationaux

Le CITEPA rapporte chaque année l'inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France. Le rapport OMINEA comprend une description détaillée de ces émissions par secteur émetteur. Les émissions liées à la combustion des chaudières au gaz (SNAP 010203) à puissance inférieure à 50 MW ou supérieure à 20 MW sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 102 : Émissions liées à la combustion pour la génération de 1 GJ d'énergie par une chaudière

Composé	Émission pour 1 GJ généré par une chaudière au gaz	Émission pour 1 MWh_{PCI} généré par une chaudière au gaz	Émission pour 1 Nm³ généré par une chaudière au gaz
Méthane	1 g/GJ	0,278 g/MWh_{PCI}	0,207 mg/Nm³
CO	30 g/GJ	8,34 g/MWh_{PCI}	6,2 mg/Nm³
COVMN	2 g/GJ	0,56 g/MWh_{PCI}	0,41 mg/Nm³
NO_x	60 g/GJ	16,7 g/MWh_{PCI}	12,4 mg/Nm³
Dioxines et furanes	0,5 ng/GJ	0,139 ng/MWh_{PCI}	103,5 ng/Nm³
Poussières	0,9 g/GJ	0,25 g/MWh_{PCI}	0,186 mg/Nm³
SO_x	0,5 g/GJ	0,139 g/MWh_{PCI}	0,103 mg/Nm³

La méthode 2 a été retenue afin d'appliquer une approche cohérente avec la filière biomasse et de coller à la réalité de terrain et ainsi retranscrire des performances réelles mesurées plutôt que des seuils.

Exploitation/Fonctionnement de la chaufferie

Tableau 103 : Fonctionnement de la chaufferie

	Cas de base	Variante
Rendement global (%)	85	85-100 %
Consommation d'électricité (kWh/MWh sortie chaufferie)	24	
Fonctionnement à équivalent pleine puissance (h/an)	2 300	
Durée de vie moyenne de l'installation (génie civil) (an)	35	

4. Résultats

4.1. Préalable – Guide de lecture des résultats

Les résultats de l'évaluation environnementale des impacts du cycle de vie présentés ci-après sont des expressions relatives et dès lors ne prédisent pas :

- les effets sur les impacts finaux (ressources, santé humaine et biodiversité) ;
- les dépassement des seuils légaux ;
- les marges de sécurité ou les risques.

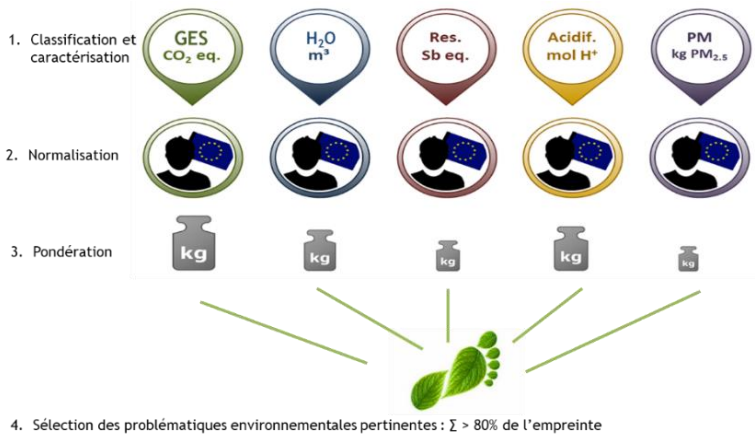
4.2. Enjeux environnementaux pertinents pour la filière gaz

La détermination des enjeux environnementaux pertinents pour les filières bois énergie étudiées dans le cadre de ce projet a été réalisée en appliquant la méthode de normalisation/pondération du projet européen Product Environmental Footprint (PEF). Cette méthode consiste en quatre étapes :

1. Classification et caractérisation des contributions ;
2. Normalisation sur base de l'impact d'un équivalent habitant européen sur une année ;
3. Pondération des enjeux environnementaux ;
4. Sélection des problématiques environnementales pertinentes.

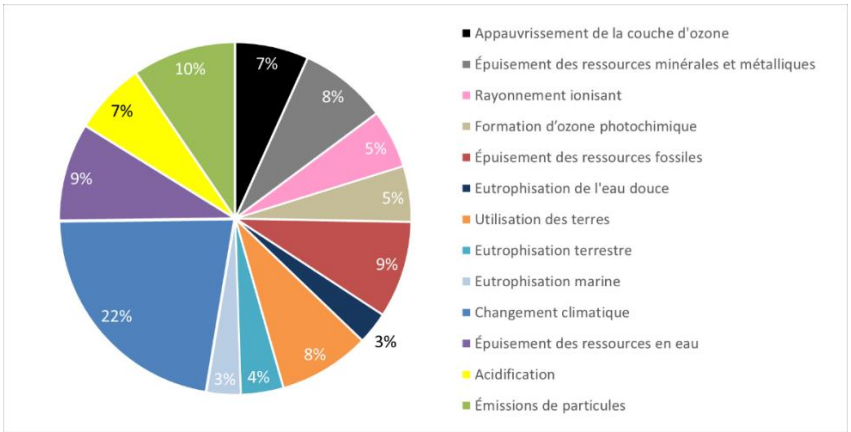
Les différentes étapes sont schématisées dans le figure ci-dessous.

Figure 46 : Méthode utilisée pour la détermination des enjeux environnementaux pertinents.



Les informations détaillées relatives à la normalisation et à la pondération sont présentées en annexe au paragraphes 8.3 et 8.4. Les facteurs de pondération sont présentés à la figure ci-dessous.

Figure 47 : Facteurs de pondération

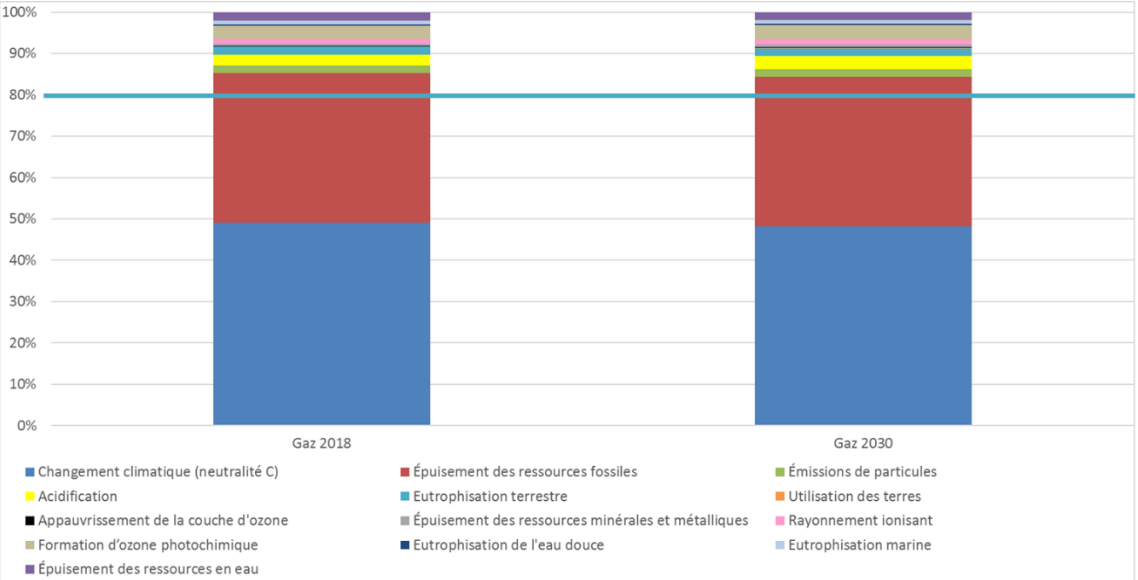


Les enjeux pertinents sont définis comme étant ceux dont la somme des contributions à l'empreinte totale atteint a minima 80 % de celle-ci (**ligne turquoise**) pour chaque scénario.

Parmi les enjeux environnementaux étudiés dans le cadre de cette étude, ceux qui sont identifiés comme les plus pertinents pour la filière gaz étudiée sont :

- changement climatique ;
- utilisation des ressources fossiles (et nucléaires).

Figure 48 : Répartition en pourcentage de l'empreinte environnementale entre les différents enjeux environnementaux



Ces deux enjeux environnementaux étant également étudiés dans le cadre des filières bois énergie, l'analyse suivante sera réalisée sur base des 5 enjeux identifiés comme pertinents pour les filières bois énergie (en excluant l'eutrophisation terrestre).

4.3. Comparaison entre la filière gaz et les filières bois énergie pour la production de chaleur

Les scénarios relatifs à la filière bois énergie présentés dans le cadre de cette comparaison se rapportent à l'ensemble des variantes suivantes :

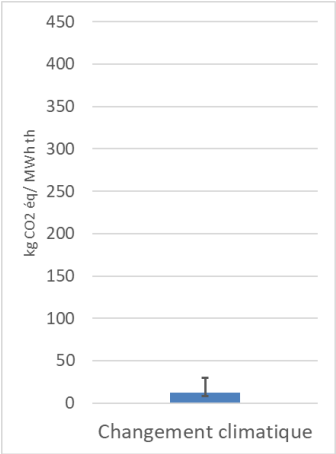
- type de combustible ;
- distance de transport accrue vers la chaufferie ;
- émissions supérieures à la réglementation ;
- émissions conformes à la nouvelle réglementation ;
- mise en place d'une unité de condensation ;
- présence du traitement des fumées « SNCR » ;
- type de peuplement, de produits récoltés et de sylviculture pour la réalisation de plaquettes forestières.

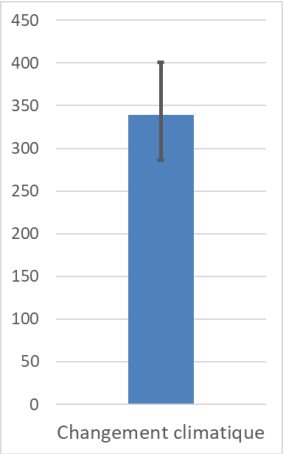
La valeur min et maximale correspondent à la variabilité liée à l'ensemble de ces variantes. Pour le gaz, la valeur représentée par l'histogramme correspond au scénario 2018.

Au regard des différents enjeux environnementaux étudiés, il apparait que l'intérêt de la filière bois énergie par rapport à celle au gaz naturel est variable suivant les enjeux environnementaux considérés.

En ce qui concerne la contribution au changement climatique et en prenant en compte l'ensemble des variabilités des deux filières (hors chaudière de faible puissance), il apparait que la filière de production de chaleur à partir de gaz naturel est plus contributrice que la filière bois énergie. Les éléments expliquant la valeur maximale et minimale des « barres d'erreur » sont présentés dans le tableau sous la figure.

Figure 49 : Analyse comparative des deux filières de production de chaleur pour l'enjeu « changement climatique » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en kg CO_2 éq)





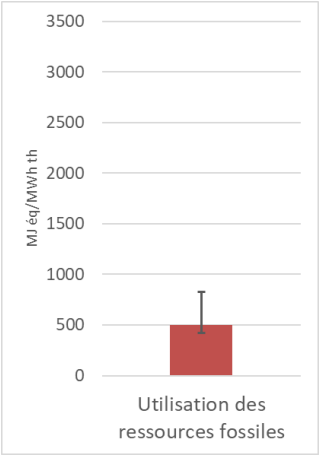
Filière Bois énergie **<** **Filière Gaz naturel**

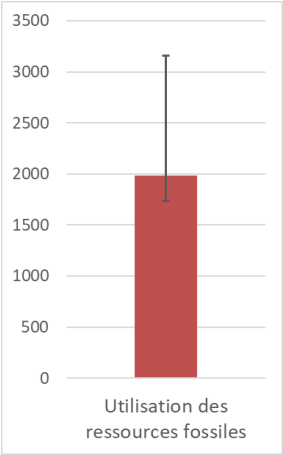
Valeur max	Type de biomasse – plaquettes forestières avec un itinéraire de gestion sylvicole plus complexes	Fuites de méthane élevées
	30 kg CO_2 éq/MWh_{th}	*400 kg CO_2 éq/MWh_{th}*
Valeur min	Type de biomasse - Déchets	Haut rendement Fuites de méthane faibles
	11 kg CO_2 éq/MWh_{th}	*290 kg CO_2 éq/MWh_{th}*[141]

[141] La valeur du facteur d'émission disponible dans la Base Carbone ADEME est de 242 kg CO_2 eq/MWh th.

En ce qui concerne la contribution à l'utilisation des ressources fossiles et nucléaires et en prenant en compte l'ensemble des variabilités des deux filières (hors chaudière de faible puissance), il apparait que la filière de production de chaleur à partir de gaz naturel est plus contributrice que la filière bois énergie. Les éléments expliquant la valeur maximale et minimale des « barres d'erreur » sont présentés dans le tableau sous la figure.

Figure 50 : Analyse comparative des deux filières de production de chaleur pour l'enjeu « Utilisation des ressources fossiles et nucléaires » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en MJ éq)



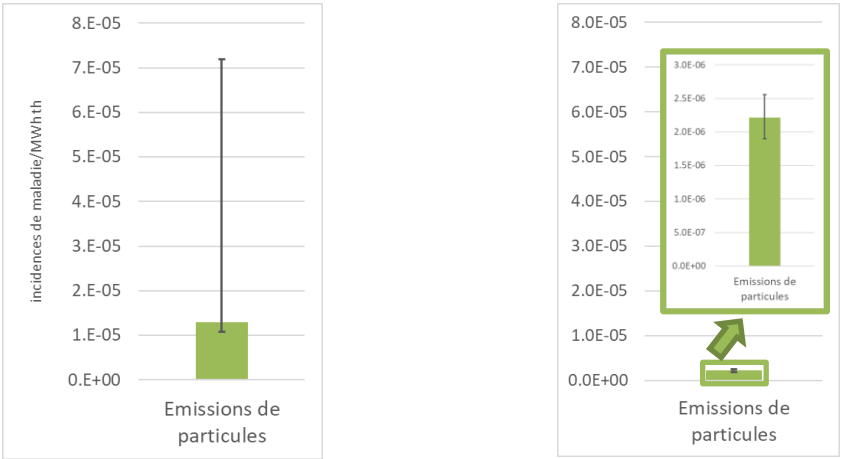


Filière Bois énergie < Filière Gaz naturel

Valeur max	Type de biomasse - Granulés	Mix d'approvisionnement plus défavorable
	825 kg MJ éq/MWh_{th}	*3160 MJ éq/MWh_{th}*
Valeur min	Type de biomasse - Déchets	Haut rendement
	447 kg MJ éq/MWh_{th}	*1740 MJ éq/MWh_{th}*

En ce qui concerne la contribution à l'émission de particules et en prenant en compte l'ensemble des variabilités des deux filières (hors chaudière de faible puissance[142]), il apparait que la filière de production de chaleur à partir de gaz naturel est moins contributrice que la filière bois énergie. Les éléments expliquant la valeur maximale et minimale des « barres d'erreur » sont présentés dans le tableau sous la figure.

Figure 51 : Analyse comparative des deux filières de production de chaleur pour l'enjeu « Émissions de particules » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en incidences de maladie)



Filière Bois énergie > Filière Gaz naturel

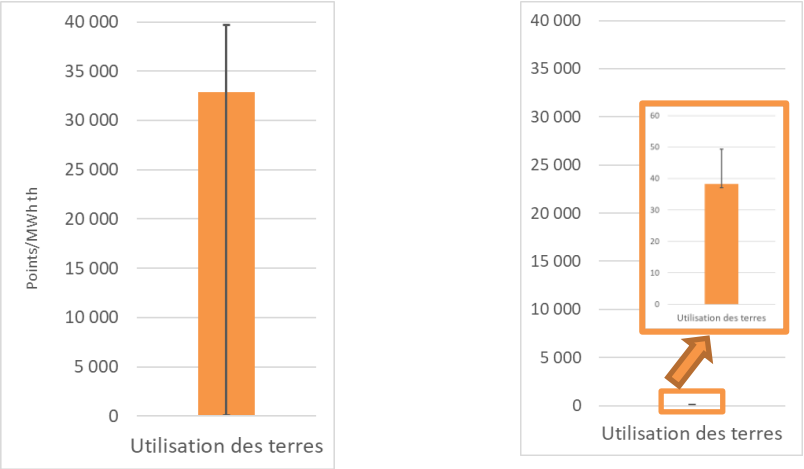
Valeur max	Dépassement des normes d'émissions lors du démarrage des chaufferies ou en cas de sous-dimensionnement des installation (régime de fonctionnement éloigné du plein régime).	/
	7,2 E-5 incidence de maladie/MWh_{th}	*2,5 E-6 Incidence de maladie/MWh_{th}*
Valeur min	Chaufferie avec des systèmes performants d'abattement des particules	/
	1,1 E-5 Incidence de maladie/MWh_{th}	*1,9 E-6 Incidence de maladie/MWh_{th}*

En ce qui concerne la contribution à l'utilisation des terres et en prenant en compte l'ensemble des variabilités des deux filières (hors chaudière de faible puissance), il apparait que la filière de production de chaleur à partir de gaz naturel est moins contributrice que la filière bois énergie. Les éléments expliquant la valeur maximale et minimale des « barres d'erreur » sont présentés dans le tableau sous la figure.

Pour le calcul de cet enjeu, l'hypothèse est faite que l'occupation des sols est allouée à la fonction de production de bois uniquement et non aux autres fonctions de la forêt (chasse, cueillettes, promenade, etc.).

[142] Lié au niveau d'incertitude des niveaux actuels d'émissions atmosphériques des petites chaufferies (voir 3.4.2)

Figure 52 : Analyse comparative des deux filières de production de chaleur pour l'enjeu « Utilisation des terres » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en point)

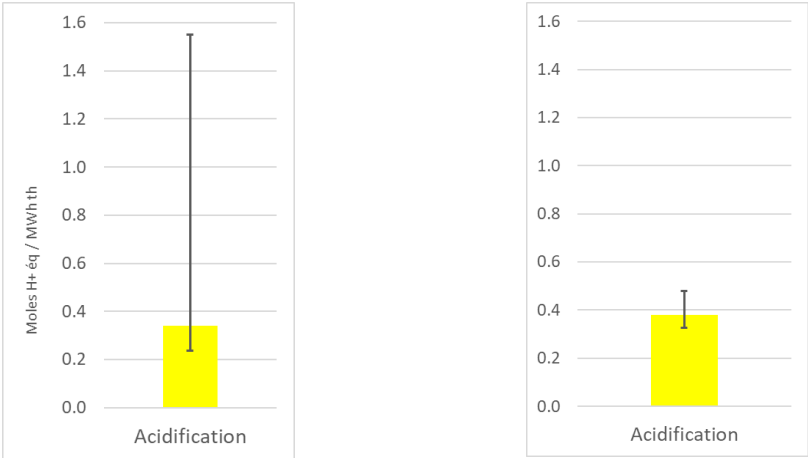


Filière Bois énergie > Filière Gaz naturel[137]

Valeur max	Biomasse utilisée – Plaquettes forestières	/
	39 700 points/MWh_{th}	*50 points/MWh_{th}*
Valeur min	Biomasse utilisée - Menus bois et souches ou déchets	/
	27 points/MWh_{th}	*37 points/MWh_{th}*

En ce qui concerne la contribution à l'acidification de l'air et en prenant en compte l'ensemble des variabilités des deux filières (hors chaudière de faible puissance), il apparait qu'il n'est pas possible de se prononcer en faveur d'une filière ou d'une autre.

Figure 53 : Analyse comparative des deux filières de production de chaleur pour l'enjeu « Acidification de l'air » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en moles H+ éq.)



Filière Bois énergie ≈ Filière Gaz naturel

Valeur max	Dépassement des normes d'émissions lors du démarrage des chaufferies ou en cas de sous-dimensionnement des installations (régime de fonctionnement éloigné du plein régime).	/
	1,55 moles H+ éq/MWh_{th}	*0,48 moles H+ éq/MWh_{th}*
Valeur min	Foyer bas NOx ou SNCR	/
	0,24 moles H+ éq/MWh_{th}	*0,32 moles H+ éq/MWh_{th}*

5. Conclusions

Conclusion 17 : **Comparativement à une alimentation de la chaufferie au gaz naturel, le bois énergie collectif et industriel présente des émissions de GES, et une consommation de ressource fossile moindre, mais présente des émissions de particules plus élevées.**

Les systèmes de réduction des émissions de polluants atmosphériques pour la filière bois énergie et le taux de fuite de méthane pour la filière gaz sont les paramètres devant faire l'objet de la plus grande attention pour diminuer la contribution de ces deux filières aux enjeux environnementaux.

La filière de production de chaleur à partir de bois dans le secteur collectif et industriel présente un intérêt environnemental important par rapport au gaz pour le changement climatique et l'utilisation des ressources fossiles et nucléaires tels que présentés dans les figures ci-dessous.

Concernant l'émission de particules, le gaz présente de meilleures performances tels que présentés en vert dans le tableau et la figure ci-dessous. La filière bois énergie doit poursuivre les efforts engagés afin de limiter ces émissions.

Tableau 104 : Comparaison des contributions des filières gaz naturel et bois énergie à différents indicateurs environnementaux

	Filière alimentée par du gaz naturel	Filière alimentée par du bois
Émissions de particules	-	+
Acidification de l'air	~	~
Changement climatique*	+	-
Utilisation des ressources fossiles (et nucléaires)	+	-

Légende :

- : moins contributeur + : plus contributeur ~ : contribution équivalente

* avec hypothèse neutralité carbone des émissions CO_2 de combustion du bois. Les résultats du lot 2 complètent l'analyse concernant l'indicateur changement climatique.

La préférence d'une filière sur une autre dépend :

- pour les « chaufferies biomasse » :
  - des spécificités locales en termes de sources de biomasse utilisées,
  - des spécificités en termes de puissance à délivrer,
  - des rendements de la chaufferie ;
- pour les « chaufferies gaz » :
  - de l'origine d'approvisionnement du gaz naturel,
  - des performances associées du transport (taux de fuites de méthane),
  - des rendements de la chaufferie.

PARTIE 3 : ÉVALUATION DU BILAN GES DE LA PRODUCTION DE CHALEUR A PARTIR DE PLAQUETTES FORESTIERES, ISSUES DE DIFFERENTS SCENARIOS SYLVICOLES INTEGRANT UNE RECOLTE ACCRUE DU BOIS EN FORET

L'approche developpée dans cette section est « innovante et exploratoire » et devra faire l'objet d'approfondissements. Ceux-ci sont présentés à la section 8 « Limites et besoins de recherche complémentaires ».

1. Contexte, objectif et méthode

L'augmentation de la récolte de biomasse influe sur les stocks de carbone en forêt et sur la capacité des forêts à séquestrer le carbone.

Les forêts captent naturellement du carbone atmosphérique, par le mécanisme de la photosynthèse, et le maintiennent hors de l'atmosphère dans les écosystèmes forestiers et dans les produits bois (dans le bois matériau pour la construction, l'ameublement et l'emballage). Les forêts constituent ainsi des réservoirs de carbone, dans les arbres vivants (biomasse aérienne et souterraine), mais aussi dans les bois morts et dans le sol de ces milieux. Elles peuvent aussi constituer un « puits de carbone » si l'accroissement biologique de la forêt est supérieur aux pertes par mortalité et prélèvements de bois ou, inversement, une « source de carbone » lorsque les pertes sont supérieures à l'accroissement de la forêt. Il faut noter qu'une molécule de CO_2 agit de la même façon sur l'effet de serre, quelle que soit sa provenance biogénique (issues de la forêt) ou fossile. Cependant, la biomasse produit durablement est une ressource renouvelable mais cela n'implique pas qu'elle ne génère pas d'impact sur le climat. Un développement accru de son usage peut avoir une incidence sur les niveaux d'exploitation des forêts. Pour évaluer l'impact climatique, il est nécessaire de prendre en compte les effets que ce développement peut avoir sur les stocks et les puits actuels des forets en se comparant par rapport un scénario de référence.

En France métropolitaine, les stocks en forêt sont estimés à 1 226 Mt de carbone dans la biomasse et de 1 140 Mt de carbone dans les sols forestiers. Chaque année, le stock de carbone en forêt augmente : selon l'inventaire national pour le secteur UTCATF[143] la forêt française métropolitaine constitue ainsi un important « puits » de carbone : en 2016, l'augmentation de stock de carbone dans les forêts gérées a permis la séquestration de 55 Mt CO_2, par an, l'équivalent d'environ 13 % des émissions annuelles de CO_2 du pays (hors secteur UTCATF). Les produits bois matériaux constituent un autre réservoir de carbone, toutefois beaucoup moins important que celui des écosystèmes (stocks estimés à 85,3 Mt C). En France, le développement de la filière bois matériau génère un accroissement net du stock dans les produits bois estimé, en 2017, à 1,2 $MtCO_2$ par an.

<u>Définitions préalables</u>

Puits de carbone ou séquestration carbone : tout processus, activité ou mécanisme qui élimine de l'atmosphère un gaz à effet de serre, et le maintien en dehors de l'atmosphère (Matthews et al., 2014).

Source : tout procédé, activité ou mécanisme qui libère dans l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur de gaz à effet de serre ou d'aérosol (Glossaire du GIEC, Planton et al., 2013).

Stock (ou réservoir) : composante du système climatique, autre que l'atmosphère, ayant la capacité de stocker, d'accumuler ou de libérer une substance potentiellement nocive (carbone, gaz à effet de serre, précurseur, etc.). Les océans, les sols et les forêts sont des exemples de stocks de carbone (Glossaire du GIEC, Planton et al., 2013). Les stocks associés à la filière forêt bois sont constitués des stocks en forêt (biomasse aérienne, biomasse souterraine, bois mort, litière, et matière organique des sols) et des stocks dans les produits qui en découlent.

Le stock de carbone d'un réservoir peut varier en fonction des gains et des pertes. Lorsque les pertes sont supérieures aux gains, le stock diminue, et le réservoir est donc une source ; lorsque les gains sont supérieurs aux pertes, le réservoir accumule le carbone, et est donc un puits (Lignes directrices du GIEC pour le secteur UTCATF, Eggleston, Buendia, & 三輪, 2006).

[143] Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Foresterie : ce secteur comprend les émissions/absorptions de GES résultant de l'utilisation des terres (sans changement d'utilisation, par exemple une forêt restant une forêt) et des changements d'affectation des terres (avec des changements d'affectation des terres, par exemple une prairie convertie en forêt ou une forêt convertie en sol cultivé).

La variation des stocks de carbone en forêt correspond à une soustraction des pertes de carbone de la biomasse (récolte, perturbations) des gains de carbone de la biomasse (accroissement annuel ou « pompe ») (Lignes directrices du GIEC pour le secteur UTCATF, Eggleston et al., 2006).

Neutralité carbone des émissions de CO_2 de combustion ou dégradation du bois : le principe de cette approche est de considérer que chaque émission de carbone biogénique correspond à une absorption équivalente de CO_2, plus ou moins proche dans le temps, via la photosynthèse (ADEME, Benoist, Cornillier, & Piednoir, 2015).

Prélever davantage en forêt influe sur les dynamiques de stockage de carbone dans les forêts, même si une partie de ce carbone peut alimenter le réservoir des produits bois. L'augmentation de la récolte de biomasse pose des questions sur l'impact climatique qu'elle génère, mais de nombreuses incertitudes au niveau des mécanismes et des données existent.

En France, deux études ont travaillé sur la question en développant une approche nationale. Les études (Valade, Bellassen, Luyssaert, Vallet, & Njakou Djomo, 2017) et (Dhôte et al., 2017a) travaillant à l'horizon 2050 montrent une baisse du puits forestier dans le cas où l'on augmenterait les prélèvements pour satisfaire l'augmentation de la demande en bois matériau et énergie renouvelable par rapport à un scénario de référence où ces prélèvements ne seraient pas augmentés. Ces études montrent également une hausse, plus faible, du puits de carbone dans les produits récoltés. À l'échelle nationale, les deux études concluent que dans l'ensemble des scénarios d'augmentation de la récolte testés, les stocks de carbone en forêt augmentent toujours par rapport à la situation actuelle, mais moins vite que dans un scénario sans augmentation de la récolte.

Ainsi, le projet de recherche Bicaff (Valade et al., 2017) conclut à une diminution du puits de carbone (en intégrant les forêts et les produits bois) à l'horizon 2050 de 953 Mt CO_2 cumulé entre 2015 et 2050 pour une augmentation de la récolte de bois de 1483 Mm³ (cumulé entre 2015 et 2050). Cette variation représente une réduction de 0,6 tCO_2 par m³ de bois supplémentaire prélevé (variant entre 0,3 tCO_2 par m³ et 1,5 tCO_2 par m³ selon le scénario de récolte considéré). Le projet de recherche (Dhôte et al., 2017a) évalue une diminution du puits de carbone intégrant la forêt et les produits comprise entre 1,1 et 1,5 t CO_2/m³ supplémentaire récolté à l'horizon 2050 selon le modèle et le scénario utilisé. Ces premières valeurs sont d'un ordre de grandeur important et ne peuvent pas être négligées dans les évaluations climatiques du développement de la filière bois.

On peut noter que les conclusions de l'étude (Dhôte et al., 2017a) marquent également la nécessité d'intégrer dans ces réflexions les impacts des aléas associés au changement climatique (tempêtes, maladies) sur les forêts, ces aléas pouvant conduire à une fragilisation des stocks de carbone accumulés en forêt. L'évaluation du niveau d'impact de ces évènements selon les stratégies de mobilisation de la biomasse reste donc une limite de ces études.

Ces différents travaux réalisés au niveau national sont complexes et intègrent de multiples facteurs qui peuvent influencer les résultats : horizon du temps considéré, type de changement de pratique sylvicole (remise en gestion de forêts, réduction des âges d'exploitabilité, changements des essences, modèles de croissance choisis et accroissement des surfaces forestières) ou la répartition de la récolte entre le bois matériaux (incluant le bois d'œuvre et le bois d'industrie) et le bois énergie, etc.

L'ADEME a souhaité continuer d'investiguer cette question en déployant non plus des approches modélisatrices nationales (approche dite « macro ») mais en développant des analyses d'impact au niveau d'une parcelle ou d'un paysage forestier (approche dite « micro ») qui permettront de mieux distinguer les pratiques sylvicoles et travailler à différents horizons du temps. Cette partie 3 du présent rapport s'attache à ces questions.

Les pouvoirs publics souhaitent évaluer l'impact des variations de stocks dans les écosystèmes associés à la récolte accrue de biomasse.

Dans ce contexte, le lot 2 propose une première approche de quantification du bilan GES de l'énergie produite à partir de plaquettes forestières issue de différents scénarios sylvicoles produisant une récolte accrue de bois. Cette approche prend en compte l'impact des variations de carbone forestier (dans les forêts et les produits bois) associées aux changements de pratiques sylvicoles ou d'occupation des sols.

Ainsi cette deuxième partie permet, en utilisant une approche à la parcelle, pour quelques scénarios donnés:

- d'évaluer l'impact (positif ou négatif) de la production et récolte accrue de bois dans un nombre limité de scénarios types – pour alimenter les installations de combustion de biomasse – sur le stockage de carbone forestier, par rapport à un scénario de référence ;
- d'apporter des éléments pour sélectionner les pratiques sylvicoles permettant d'augmenter la production de bois énergie tout en limitant la diminution ou en augmentant les stocks moyens de carbone en forêt ;
- d'évaluer la part potentielle de l'impact des GES d'origine biogénique par rapport aux émissions d'origine fossile selon les calculs du lot 1.

Pour ce faire, aux résultats de cette troisième partie sont intégrés les résultats de la première partie, centrée sur les émissions de gaz à effet de serre fossiles associées à l'ensemble du cycle de vie (intégrant l'utilisation d'énergie pour la sylviculture, l'exploitation forestière, le transport du bois et la transformation éventuelle en plaquettes, granulés ou autres jusqu'à la production d'énergie et la gestion de cendres).

Deux échelles de temps sont étudiées (30 ans et 100 ans) pour tenir compte des dynamiques temporelles des processus de stockage et déstockage de carbone dans les réservoirs forestiers. L'échelle de temps considérée dans l'analyse est en effet un élément important. Pour éclairer les décisions, la contribution des actions à l'atténuation du changement climatique à court terme doit être mise en regard avec leur contribution à moyen et long terme. Les horizons de temps de la forêt (plusieurs décennies voire siècles) s'articulent avec ceux du changement climatique (objectif de neutralité carbone en 2050).

L'objet de ce rapport est de mieux comprendre, dans le contexte actuel de développement du bois énergie, l'impact climatique de la création des installations bois énergie collectif et industriel dans différentes situations. Dans cette partie du rapport, il s'agit d'étudier l'impact climatique de l'augmentation de la récolte de bois en forêt nécessaire à l'alimentation des nouvelles installations. Nous considérons que le bois utilisé dans les nouvelles installations ne conduit pas à réduire les usages actuels du bois (ex : bois industrie, bois bûche).

Nous pouvons cependant noter qu'aujourd'hui la récolte totale de bois en France reste relativement constante malgré l'augmentation des installations bois énergie collectif et industriel. Cela peut être lié à la réduction de la récolte de bois bûche en autoconsommation et de bois pour des panneaux particules (cette filière renforce actuellement ses approvisionnements en bois recyclé). L'impact de ces modifications d'usages du bois n'a pas été étudié dans ce rapport.

L'objectif de l'étude est donc d'évaluer l'impact climatique de l'énergie produite par différents scénarios sylvicoles sélectionnés intégrant une récolte accrue du bois (mise en gestion de taillis, récolte de menus bois/souches/houppiers, plantation sur la déprise agricole). Les résultats sont valables pour l'énergie produite dans ces scénarios intégrant une modification des pratiques sylvicoles. Ils sont spécifiques aux scénarios testés et ne sont pas généralisables à tous les MWh produits en France à partir de plaquettes forestières. L'étude s'est concentrée sur le bois énergie. Lorsque les scénarios incluent des productions de bois matériau, nous n'avons pas développé les calculs sur l'impact environnemental de ces produits et leur comparaison à un autre matériau non-bois qu'il pourrait venir remplacer.

L'ADEME souhaite quantifier la plage de variabilité des résultats qui seront calculés. Dans la mesure du possible, des fourchettes ont été données pour certains paramètres des scénarios envisagés.

Cette approche est considérée comme « innovante et exploratoire » et devra faire l'objet d'approfondissements.

Le principe de neutralité carbone ne suffit pas pour évaluer l'ensemble des impacts climatiques des prélèvements accrus du bois.

Le principe retenu jusque-là par la réglementation en termes de calcul d'émissions de gaz à effet de serre est celui de la neutralité carbone, c'est-à-dire que l'impact des émissions associées à la combustion de la biomasse solide est considéré nul. Le principe initial de cette approche est de considérer que, puisque le carbone biogénique s'inscrit dans un cycle et est issu d'un réservoir se renouvelant, chaque émission de carbone biogénique correspond à une absorption équivalente de CO_2, plus ou moins proche dans le temps. Différentes interprétations du principe peuvent cependant être réalisées, qui se distinguent notamment par l'échelle forestière d'interprétation.

Au niveau « micro », c'est-à-dire au niveau d'une parcelle :

Dans une forêt soumise à des cycles d'exploitation réguliers, le carbone émis lors de la combustion/dégradation du bois est capté au fil des années de repousse et, en moyenne sur des dizaines voire centaines d'années, on récupère les stocks de carbone dans un mécanisme décrit comme « neutre » en émissions de CO_2. Ce concept présuppose un rythme d'exploitation stable de la forêt.

À l'échelle d'une unité de gestion où l'exploitation est régulière :

Dans un système d'exploitation « théorique », on prélève annuellement dans une parcelle l'accroissement accumulé dans les autres parcelles. Le taux de prélèvements est égal à l'accroissement de la forêt et les stocks de carbone à l'échelle de l'unité de gestion restent donc stables. Les émissions de combustion/dégradation du bois prélevé dans l'unité de gestion sont considérées neutres en carbone. Ici encore, cette approche se justifie pour un système qui ne change pas son rythme d'exploitation, donc hors de toute considération du développement de la filière.

À l'échelle « macro », c'est-à-dire au niveau de la forêt française :

En France, le taux de prélèvement en forêt est inférieur à l'accroissement de la forêt : les stocks de carbone dans les forêts augmentent chaque année. Cette tendance nationale a jusqu'alors justifié de ne pas comptabiliser les émissions de

combustion/dégradation du bois prélevé en forêt. Cependant, cette approche est incomplète : elle ne permet pas de prendre en compte l'impact d'une augmentation de la récolte sur l'évolution du puits forestier.

Le concept de neutralité carbone ne prend donc pas en compte l'impact climatique généré par les variations des stocks de carbone forestiers liées à une modification du rythme ou du taux de prélèvements, ce qui peut s'observer dans un contexte de développement de la filière bois. Selon le niveau de prélèvement et les pratiques sylvicoles, la forêt peut stocker plus ou moins de carbone. La variation de la capacité à stocker de la forêt (donc de générer un puits de carbone) n'entre pas en considération dans ces définitions. Le principe de neutralité carbone ne permet pas non plus de tenir compte des dynamiques temporelles des processus de stockage et déstockage du carbone selon l'année où cette séquestration ou émission a lieu.

Le principe de neutralité carbone des émissions de combustion/dégradation du bois ne suffit donc pas pour évaluer l'ensemble des impacts climatiques des prélèvements accrus du bois engendrés par le développement de la filière bois. Ce concept est donc insuffisant pour comprendre l'impact sur le changement climatique du bois énergie collectif et industriel dans un contexte où l'objectif politique est d'augmenter fortement les prélèvements de bois en forêt.

Le principe de neutralité carbone a été ainsi remis en question dès 2013 dans de nombreuses publications scientifiques[144].

Aujourd'hui, la directive européenne sur les énergies renouvelables (Directive ENR & European Parliament, 2018) a remarqué l'importance de la prise en compte des variations de stocks de carbone associées à des changements de pratiques sylvicoles, en proposant notamment une prise en compte au niveau des inventaires nationaux. Le règlement UTCATF (UE) n° 2018/841 en est la traduction réglementaire. Celui-ci demande à ce que les variations de carbone soient évaluées (par rapport un niveau de référence projeté « business as usual » au niveau des inventaires nationaux). Toutefois, l'analyse de cycle de vie est une analyse qui s'attache à comprendre les impacts de la production d'une unité d'énergie en fonction des situations particulières. Il est alors nécessaire de comptabiliser les variations de carbone non plus séparément à une échelle nationale, mais au cas par cas (par rapport à la non-existence de cette installation bois énergie).

On peut noter qu'en plus de la prise en compte des variations des stocks de carbone dans les écosystèmes, la (Directive ENR & European Parliament, 2018) impose d'autres critères de durabilité pour la biomasse solide. La gestion durable des forêts est une des premières exigences de la directive. La biomasse doit être issue d'une exploitation forestière respectant la qualité des sols et la biodiversité, doit maintenir et améliorer la capacité de production à long terme de la forêt. Les lois forestières en vigueur en France assurent une gestion durable des forêts et la publication régulière par le Ministère de l'Agriculture des indicateurs de gestion durable de la forêt française permet de suivre l'évolution de celle-ci en matière de durabilité.

L'évaluation de l'impact sur le changement climatique des changements des pratiques de gestion sylvicole a été réalisée en utilisant la méthode de conversion ILCD.

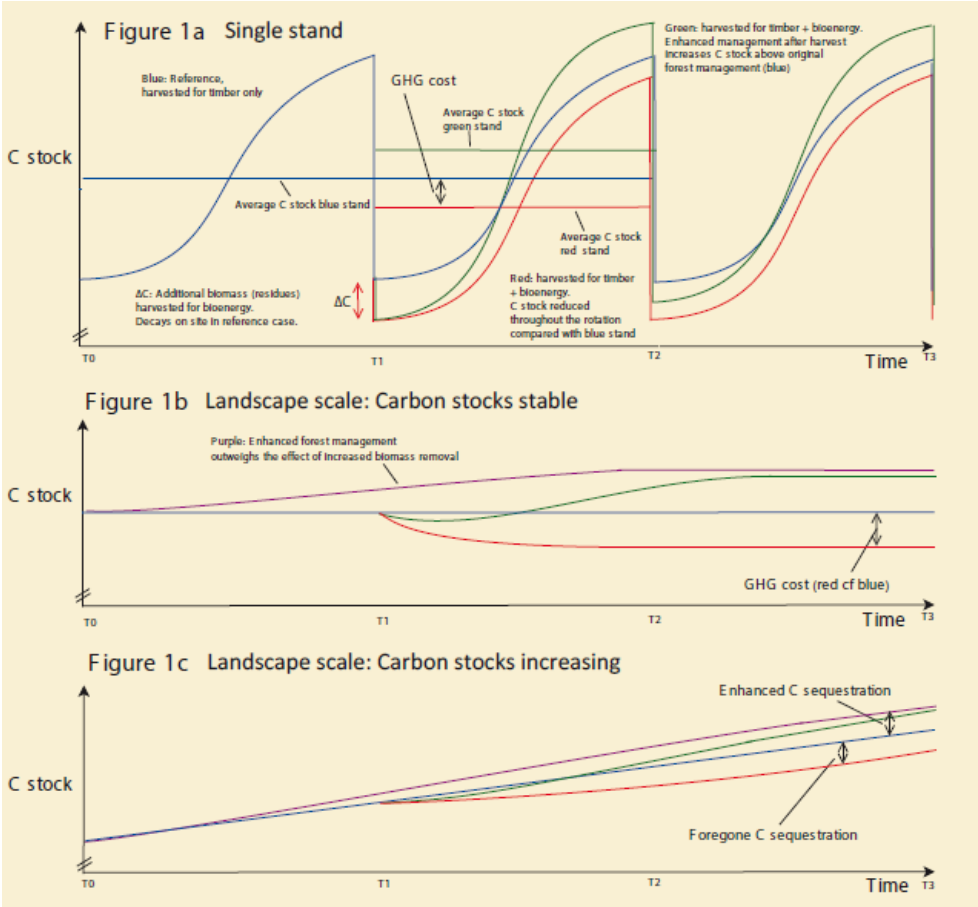
Une étude préliminaire à la réalisation de bilans environnementaux sur le chauffage au bois (Cornillier & Benoist, 2015) commanditée par l'ADEME a proposé une vaste revue des différentes possibilités méthodologiques et conseillé de retenir la méthode dite « conversion ILCD » (JRC, 2010) pour l'évaluation des impacts des changements de pratiques sylvicoles, également utilisée pour le calcul d'impact lors d'un changement d'occupation des sols.

La méthode de conversion ILCD assimile une différence de stock entre deux situations sur une même parcelle à un flux de carbone (Figure 54, figure 1a). Si l'on compare deux scénarios, on peut alors traduire la différence de stock par un flux positif (émission) ou par un flux négatif (puits ou séquestration). On peut ainsi considérer qu'un scénario A ayant un stock inférieur à un scénario B à l'horizon de temps t « émet » une quantité de gaz à effet de serre égale à la différence de stock. À l'échelle du massif, ce flux positif vers l'atmosphère correspond à une émission si dans la situation initiale la forêt se trouvait dans une situation d'équilibre (figure 1b) ou à une réduction du puits lorsque la situation initiale correspond à une forêt en croissance (figure 1c). La Figure 54 illustre ce principe avec des scénarios fictifs.

Figure 54 : Stocks de carbone en forêt présentés pour le scénario de référence en bleu, un scénario d'augmentation de la récolte pour l'énergie avec réduction du stock moyen en rouge, un scénario d'augmentation de la récolte pour l'énergie avec augmentation du stock moyen via une amélioration de la gestion sylvicole en vert, le scénario d'anticipation d'augmentation de la récolte en violet – Figure 1a : à

[144] JRC, Carbon accounting of forest bioenergy (2013)

l'échelle de la parcelle – Figure 1b : à l'échelle du massif dont les stocks sont à l'équilibre – Figure 1c : à l'échelle du massif dont les stocks augmentent (Cowie, Berndes, & Smith, 2013)



Ainsi le scénario d'augmentation de récolte présenté en rouge présente un stock moyen en forêt inférieur au stock du scénario de référence en bleu. Un scénario permettant d'augmenter la récolte tout en augmentant les stocks de carbone est également présenté en vert et en violet. Le différentiel de stock moyen au niveau de la parcelle est assimilée à une émission pour le scénario en rouge et à une séquestration de carbone pour le scénario en vert et violet. Les scénarios d'augmentation du stock de carbone anticipant la récolte de bois énergie (courbe en violet) peuvent par exemple correspondre à des scénarios d'augmentation de la surface forestière.

La méthode appliquée peut se décomposer en 4 étapes :

Étape 1

Le scénario à analyser (dit « scénario projet ») est défini, ainsi qu'un scénario de référence. Dans notre cas, le scénario de référence est défini comme la situation qui aurait pris place si l'on n'avait pas décidé de prélever plus de bois. Les scénarios de référence sont donc définis comme l'évolution de la forêt sans augmentation du taux de récolte en partant de la situation actuelle de la forêt définie pour chaque scénario. Il ne s'agit pas de scénarios de gestion sylvicole préconisés par l'ADEME, il ne s'agit pas de se comparer à des forêts qui n'ont jamais eu d'intervention humaine (forêt primaire). Par exemple, pour la mise en exploitation de taillis non entretenus, le scénario de référence est la non-mise en exploitation (évolution naturelle/sans exploitation du taillis existant). Pour la récolte des menus bois/souches/houppiers, le scénario de référence est la non-récolte de ces produits annexes à la récolte de bois d'œuvre. Pour la déprise agricole, le scénario de référence est le boisement spontané.

Étape 2

Pour le scénario projet et pour le scénario de référence, la courbe d'évolution dans le temps du stock de carbone en forêt est tracée. On y suit la croissance des arbres, leur coupe et la repousse. Quand le scénario implique des débouchés produits matériaux pour le bois récolté, on suit également la courbe des stocks carbone dans les produits. Sur ces courbes, on définit un instant initial « t_0 » qui correspond au moment de la prise de décision d'une exploitation renforcée pour produire plus de bois pour l'énergie et pour le matériau (c'est-à-dire le moment où le scénario projet commence à être différent du scénario de référence). Le t_0 est donc le moment où la décision de changer la gestion sylvicole de la forêt dans le but d'augmenter la récolte de bois commence à avoir un impact sur le climat.

Étape 3

À deux horizons temporels définis à partir de t_0, à savoir 30 ans et 100 ans, on recueille les grandeurs suivantes :

- différentiel de stock de carbone moyenne en forêt entre le scénario projet et le scénario de référence, pendant la période considérée (30 ou 100 ans) ;
- différentiel de stock de carbone moyenne dans les produits entre le scénario projet et le scénario de référence, pendant la période considérée (30 ou 100 ans).

Étape 4

On rapporte cette variation de stock à la récolte additionnelle totale cumulée en bois (delta de récolte entre le scénario de référence et scénario projet) sur la période considérée (que ce soit du bois récolté pour l'énergie ou pour les produits), de manière à obtenir des ratios tC/m³ bois récolté.

On considère que les variations de carbone se concrétisent en molécules de CO_2.

Du ratio tC/m³ découle ensuite le résultat des émissions de CO_2 biogénique par m³ de bois énergie exprimées en $kgCO_2/m^3$ (émissions de CO_2 lors que le scénario projet conduit à une perte de stock par rapport à la référence, et une émission négative ou une séquestration de CO_2 lorsque le scénario projet conduit à une augmentation des stocks forestiers), puis par unité d'énergie produite, exprimée en $kgCO_2$/MWh. La conversion s'établit sur des données standardisées (chaudière de rendement 85 %, un taux d'humidité de 25 % et un PCI de 13,2 MJ/kg soit émission de 437 $kgCO_2$ par MWh d'énergie utile).

Ensuite, on intègre les résultats de la première partie de l'étude, centrée sur les émissions de GES fossiles associées à l'ensemble du cycle de vie (intégrant l'utilisation d'énergie pour la sylviculture, l'exploitation forestière, le transport du bois et la transformation éventuelle en plaquettes, granulés ou autres jusqu'à la production d'énergie et la gestion de cendres). Les résultats globaux par unité d'énergie produite intégrant ces deux composantes (variations de stocks de carbone liées à la récolte accrue et émissions fossiles du cycle de vie calculées dans la première partie de l'étude) sont présentés dans la section 6 « Présentation du bilan GES total de la production de chaleur à partir de plaquettes forestières, issues de différents scénarios sylvicoles intégrant une récolte accrue du bois en forêt ».

Étape 5

On complète l'analyse à 30 ans et à 100 ans par une analyse dite « en régime permanent » ou autrement dit « à l'infini ».

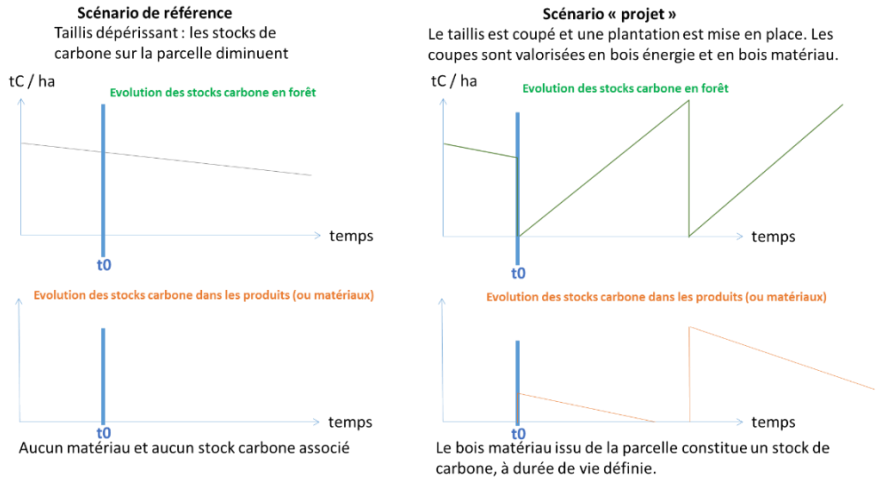
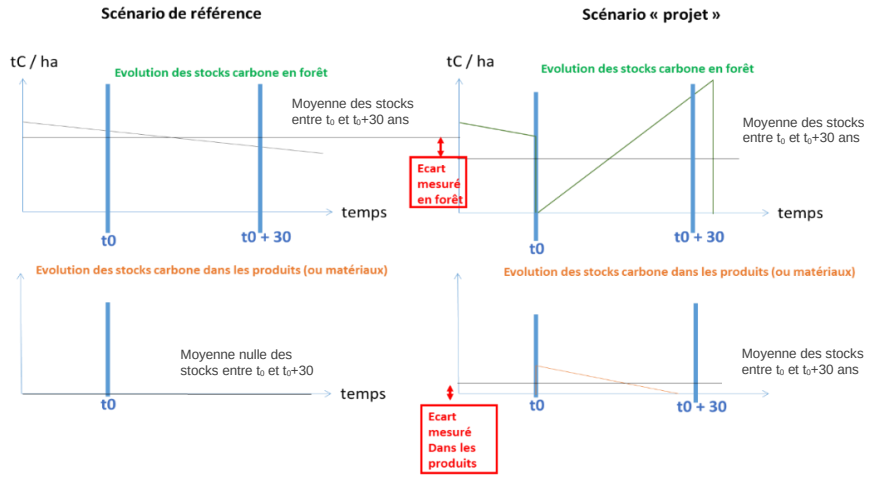
Dans ce calcul, les stocks de carbone dans les scénarios modélisant des cycles forestiers réguliers correspondent aux stocks moyens sur la durée d'une rotation. Cette valeur peut être interprétée à la fois comme la valeur moyenne obtenue sur la succession à l'infini des révolutions en régime permanent, ou comme la valeur obtenue à l'échelle d'un peuplement de plusieurs parcelles qui formeraient un ensemble d'arbres équilibré en classe d'âge. Pour les scénarios de référence ne modélisant pas des cycles réguliers, le stock moyen a été calculé sur une période de 200 ans. La différence de stock entre le scénario projet et le scénario de référence est ensuite rapportée au volume du bois additionnel récolté sur une rotation[145]. Ce calcul a été réalisé pour éviter l'effet de seuil lié à la durée de rotation (voir 8 « Limites et besoins de recherche complémentaires »).

La méthodologie pour les étapes 1 à 4 est illustrée sur un exemple dans la figure ci-dessous.

Figure 55 : Illustration schématique de la méthodologie pour la comptabilisation du carbone biogénique, pour l'horizon de temps à 30 ans sur un exemple de scénario analysé dans l'étude.

Étape 1 **Définition du scénario de référence et du scénario projet.**	Scénario de référence : un taillis dépérissant non exploité. Scénario projet : la coupe du taillis et la mise en place d'une plantation sur la parcelle, pour une récolte mixte bois énergie et bois matériau.

[145] Dans les scénarios modélisant une transformation des peuplements, la différence de stocks est rapportée au volume de bois additionnant la récolte dans le peuplement initial et la récolte sur une rotation du peuplement mis en place.

Étape 2 **Tracé de l'évolution dans le temps des stocks de carbone associés, avec définition d'un « t0 ».**	
Étape 3 **(pour 30 ans)** **On recueille l'écart de stock moyen sur 30 ans entre le scénario projet et le scénario de référence.**	 Dans cet exemple simplifié, l'écart est négatif sur les stocks en forêt (moyenne moins élevée dans le scénario projet), mais il est positif dans les produits (moyenne plus élevée dans le scénario projet).
Étape 4 **On formule les facteurs d'émissions.**	• On rapporte la somme des écarts aux m³ additionnels récoltés sur la parcelle (delta de récolte entre le scénario de référence et scénario projet) entre t0 et t0 + 30 ans en calculant ainsi les $kgCO_2/m^3$. • On convertit en $kgCO_2$/MWh, pour les m³ récoltés pour un usage bois énergie, grâce à une masse volumique du bois et au rendement de l'installation de chaufferie.

Enfin, à ces résultats sont intégrés les résultats de la première partie de l'étude, centrée sur les émissions de gaz à effet de serre fossiles associées à l'ensemble du cycle de vie et intégrant l'utilisation d'énergie pour la sylviculture, le transport du bois, la transformation éventuelle en plaquettes, granulés ou autres, jusqu'à la production d'énergie et la gestion de cendres. Cela permet de déterminer le facteur de contribution global au changement climatique (biogénique et fossile) pour les différentes filières plaquettes pour l'énergie.

L'annexe 19 présente le détail des calculs appliqués à un scénario.

Les compartiments de carbone considérés sont les suivants :

- Forêt :
  - biomasse vivante aérienne,
  - biomasse vivante souterraine,
  - bois mort,
  - carbone organique des sols (uniquement pour certains scénarios sur la base d'une revue de la bibliographie) ;
- Produits.

Les flux de gaz à effet de serre étudiés dans la partie 3 se limitent au dioxyde de carbone. D'autres gaz contribuant à l'effet de serre peuvent être émis ou captés par les forêts (méthane, N_2O, COV) mais ne sont pas intégrés dans l'étude. La méthode d'impact utilisée est similaire à celle de la partie 1 : le Pouvoir de Réchauffement Global à 100 ans en ACV dit statique. Étant donné que seules les émissions et captations de CO_2 sont évaluées dans la partie 3, le choix de l'horizon de temps n'a pas d'impact sur l'importance relative des différentes molécules contribuant à l'effet de serre.

Les modèles utilisés dans cette étude n'intègrent pas le compartiment du sol. La variation des stocks de carbone dans le compartiment du sol est donc estimée de manière déportée pour les scénarios qui ont été identifiés comme présentant un risque de variation significative. Les données relatives à l'évaluation de l'impact sur le carbone du sol sont des estimations basées sur une revue de la littérature (méthodologie différente que pour la biomasse) et ne peuvent donc pas être présentées de manière équivalente à ce qui est fait pour la biomasse aérienne et souterraine.

La section suivante présente les différents scénarios et les variations de stock en forêt et dans les produits. L'intégralité des résultats est présentée en annexe 14.

Il est rappelé que l'étude conduite ici possède une dimension exploratoire. Il s'agit essentiellement de dérouler la méthode sur quelques scénarios types de manière à avoir quelques premiers ordres de grandeur, et à analyser la faisabilité et les limites de la méthode.

2. Présentation des scénarios

À l'échelle de la parcelle, à partir d'un type de peuplement donné géré d'une façon déterminée, on peut modifier la gestion de différentes façons pour augmenter la récolte de bois énergie à court, moyen ou long terme. Il s'agit de choisir, parmi les différents types de peuplements et scénarios de gestion sylvicole possibles, ceux qui sont à analyser pour produire les combustibles présentés dans la partie 1, en fonction de leur représentativité :

- en termes de ressources disponibles de bois énergie et de bois d'industrie (BIBE) ;
- en termes de récolte et de peuplement (enquête nationale sur le mode d'approvisionnement en plaquette forestière réalisée dans le projet Gerboise) ;
- en s'appuyant sur la nature des projets retenus dans les appels d'offre Dynamic Bois ;
- en s'appuyant sur les études présentant des scénarios d'augmentation de la récolte de bois ((Dhôte et al., 2017a),(Valade et al., 2017)).

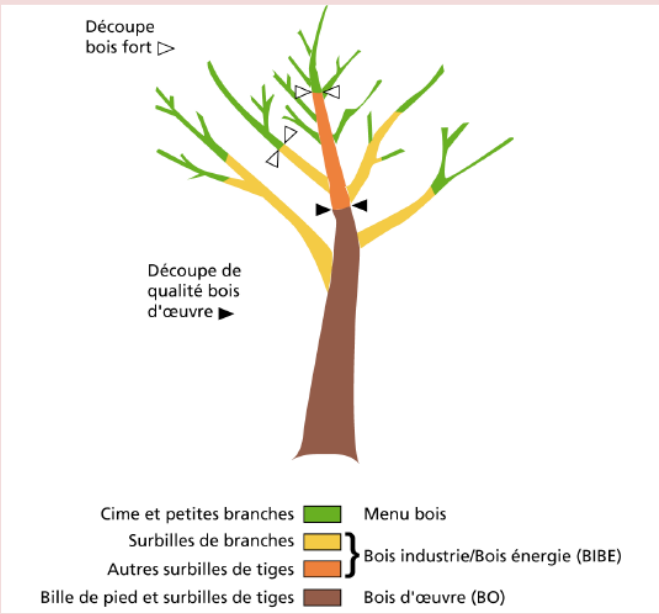
La description des scénarios étudiés est détaillée dans les sous-sections ci-après. Leur représentativité est présentée en annexe 18.

Pour aider à la compréhension, un lexique est fourni ci-dessous.

Lexique sur la segmentation de l'arbre

L'ensemble de ces définitions et la figure ci-dessous proviennent du rapport (Colin et al., 2009).

Figure 56 : Localisation dans l'arbre des principales classes et compartiments de bois : bois d'œuvre, bois d'industrie / bois énergie, et menus bois



Bois fort tige (ou bois fort) : Il s'agit du volume de la tige ou du tronc depuis la base de l'arbre jusqu'à la découpe 7 cm (bille de pied, surbille de tiges, autres surbilles de tige).

Houppier : Désigne l'ensemble des parties aériennes d'un arbre, à l'exception du tronc soit les surbilles de branches et les menus bois selon la Figure 56. Le houppier désigne donc la cime de l'arbre, les branches et les rameaux.

Souche : Partie de l'arbre située au-dessous du trait de coupe, à savoir l'ensemble des racines et la partie du tronc qui reste attachée aux racines lors de l'abattage.

Bois d'œuvre (BO) : Ce compartiment est défini comme l'ensemble de la biomasse comprise dans la bille de pied et les surbilles de tige, jusqu'à la découpe commerciale bois d'œuvre (20 cm), et qui peut avoir un usage potentiel bois d'œuvre.

Bois d'industrie et bois énergie (BIBE) : Ce compartiment est défini comme la somme de trois composantes :
(1) La biomasse de la tige comprise entre la découpe commerciale bois d'œuvre et la découpe bois fort (7 cm) ;
(2) La biomasse de la tige de dimension bois d'œuvre mais dont l'usage potentiel ne peut être le bois d'œuvre en raison de limites sur la qualité du bois ;
(3) La biomasse comprise dans les branches jusqu'à la découpe bois fort (7 cm).

Menu bois (MB) : Ce compartiment est défini comme l'ensemble de la biomasse de la tige et des branches comprise dans les bois de diamètre inférieur à 7 cm.

Lexique de gestion sylvicole

L'ensemble de ces définitions provient du lexique publié sur le site internet du Centre National de la Propriété forestière (CNPF), du site internet des Groupements Forestiers et des publications des cours d'AgroParisTech.

Éclaircie : Réduction de la densité d'un peuplement non arrivé à maturité en vue d'améliorer la croissance et la forme des arbres restants.

Futaie : Peuplement forestier composé d'arbres issus de régénération naturelle ou artificielle à partir de graines (opp. à taillis) destinés à atteindre un plein développement avant d'être récoltés.

Taillis : Peuplement issu des rejets de souches et drageons (opp. à futaie). Ne concernent que les peuplements feuillus, les résineux ne rejetant pas de souche sauf rare exception. Peuplements composés d'arbres de petit diamètre que l'on coupe périodiquement. Ce type de régime forestier est essentiellement utilisé pour produire du bois de chauffage.

Conversion d'un taillis par des coupes d'amélioration: Opération sylvicole qui consiste à passer d'un taillis (ou taillis sous futaie) à une futaie feuillue par régénération naturelle à partir des essences en place.

Transformation d'un taillis: Opération sylvicole qui consiste à remplacer le peuplement existant par un nouveau peuplement avec une ou plusieurs essences principales n'existant pas dans le peuplement initial. Dans les cas étudiés les nouveaux peuplements constitueront des futaies. Exemple : coupe d'un taillis de châtaignier suivie d'un reboisement en douglas

Taillis à Courte Rotation (TCR) : Il s'agit d'espèces qui rejettent de souche telles que le peuplier, le saule, le robinier ou l'eucalyptus qui sont exploitées avec des rotations de 5 à 10 ans pour les TCR.

Lexique sur les paramètres descriptifs de la gestion sylvicole

Les définitions données ci-dessous proviennent principalement de l'Inventaire Forestier (IFN).

Accroissement : En général augmentation du diamètre, de la hauteur, de la circonférence, de la surface terrière, du volume ou de la valeur durant une certaine période.

Fertilité : Mesure de la production d'un peuplement, établie dans des tables de production à l'aide de l'âge du peuplement et de sa hauteur.

Production : La production correspond à la somme de l'accroissement et du recrutement moins la mortalité courante. Le recrutement correspond au recensement des nouvelles tiges ayant atteint le diamètre de 10 cm.

Révolution : Nombre planifié d'années séparant la formation ou la régénération d'un peuplement forestier et le moment où ce même peuplement est abattu aux fins de récolte finale.

Demi-vie : La demi-vie correspond au temps au bout duquel le stock atteint la moitié de sa valeur initiale. La demi-vie est utilisée pour modéliser la décroissance du stock de matière organique morte et du stock dans les produits bois.

2.1. Présentation des scénarios

L'approche à la parcelle utilisée dans l'étude nous permet de distinguer les effets sur les stocks de carbone forestiers selon les pratiques sylvicoles. L'étude analyse des cas-types, modélisant des situations plus ou moins représentatives sur le territoire national. Certains scénarios ne sont pas représentatifs de façon volontaire (par exemple, les taillis à courte rotation – TCR - sur déprise agricole notamment) : ils ont alors vocation à valider ou invalider des pistes prospectives. Pour avoir une vue plus exhaustive des impacts des changements des pratiques à l'échelle nationale, il faudrait multiplier les cas étudiés en faisant varier les types de sylviculture, les essences et les conditionnes pédoclimatiques.

Il faut noter que la récolte de bois énergie en forêt est habituellement un coproduit d'une sylviculture orientée à la production de bois d'œuvre ou, dans des systèmes de taillis ne produisant pas de bois d'œuvre, la récolte de bois énergie peut être croisé avec la récolte de bois pour l'industrie ou pour l'emballage. Notons qu'aucun scénario retenu ici n'utilise du bois de qualité bois d'œuvre directement en énergie et qu'aucun scénario de gestion n'est dédié à 100 % pour l'énergie (exception faite du scénario TCR).

Nous avons différencié trois familles de scénarios :

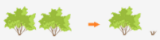
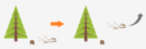
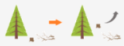
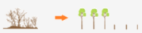
(1) les scénarios relatifs à la mise en gestion des taillis existants (cas-type 1) ;

(2) les scénarios relatifs à la récolte accrue de produits annexes à une coupe bois d'œuvre (cas-type 2) ;

(3) les scénarios relatifs à la plantation sur des terres arables actuellement non boisées en déprise agricole (cas-type 3).

Les deux premières familles de scénarios explorent les impacts des récoltes supplémentaires sans augmentation de la surface forestière. La troisième typologie de scénarios représente une situation où la surface forestière augmente.

Figure 57 : Les scénarios projet étudiés

	Cas-type 1		Cas-type 2		Cas-type 3	
	Mise en gestion d'un **taillis** (châtaigner) **non exploité**		**Récolte accrue** de **produits annexes** à la récolte de bois d'œuvre		Plantation sur **déprise agricole (non boisée)**	
Scénarios projet	Exploitation en **taillis**		**Menus bois** (futaie douglas/chêne)		**Futaie feuillus** (chêne)	
Scénarios projet	**Amélioration** en futaies feuillus		**Houppier** (douglas)		**Futaie résineux** (douglas)	
Scénarios projet	**Transformation** plantation (douglas/chêne)		**Souches** (douglas)		Taillis à courte rotation (**TCR**, eucalyptus)	
S. ref	Évolution naturelle sans exploitation de ce système de taillis		Les produits annexes ne sont pas récoltés, et se décomposent en forêt		Boisement spontané	

2.1.1. Scénarios relatifs aux taillis

Les taillis sont des bois de petit diamètre : ils sont étudiés ici car il s'agit du mode de gestion sylvicole ciblant traditionnellement les coupes de bois pour l'énergie. 43 % du volume de plaquettes forestières est issu de ce type de gestion (source : observatoire des pratiques d'exploitation mis en place dans le projet Gerboise) (voir Annexe 18).

Nous avons étudié la mise en gestion des taillis selon différents types de sylviculture : (1) en maintenant un système de taillis, (2) via une mise en gestion par conversion des taillis « bien venants » en futaies et (3) via une mise en gestion des taillis capitalisés dépérissant par transformation en plantation de futaies. Dans le premier cas, la mise en gestion a une vocation « énergie » marquée, bien que non exclusive (les taillis sont récoltés à 70 % pour l'énergie et à 30 % pour des matériaux) alors que la sylviculture dans les cas 2 et 3 est orientée vers la production de bois d'œuvre tout en générant des coproduits pour l'énergie.

Deux types des taillis ont été distingués :

- les taillis en croissance avec un avenir sylvicole, ayant atteint l'âge d'une exploitation sylvicole ;
- les taillis capitalisés, ayant dépassé l'âge prévu pour l'exploitation, et n'ayant pas été exploités depuis longtemps.

Le scénario de référence associé correspond à l'évolution naturelle sans exploitation de ce système de taillis. Différentes hypothèses d'évolution des stocks de carbone sur la parcelle ont été considérées. En effet, le système de taillis est un système sylvicole créé par l'homme pour s'approvisionner notamment en bois chauffage. Cependant, les études de disponibilité en bois montrent qu'il y a des surfaces importantes en forêt privée où cette exploitation n'a plus lieu suite au recours aux énergies fossiles. La remise en gestion de ces parcelles générerait une disponibilité en bois importante.

<u>La mise en exploitation des taillis en croissance (c'est-à-dire ayant atteint l'âge d'une exploitation sylvicole)</u>

L'enjeu est de tester différentes options sylvicoles :

- l'exploitation en maintenant le système de taillis ;
- la conversion vers une futaie par coupe d'amélioration.

Pour l'exploitation en taillis, différentes variantes ont été testées portant sur : les hypothèses d'usage du bois (quelle part pour l'énergie versus quelle part pour les matériaux) et la qualité de station (fertilité) pour l'essence (changeant le niveau d'accroissement des peuplements).

Le scénario de référence associé correspond à l'évolution naturelle d'un taillis existant non exploité suivant une légère croissance puis un dépérissement avant une stabilisation à long terme des stocks en forêt.

<u>La transformation des taillis capitalisés (c'est-à-dire ayant dépassé l'âge prévu pour son exploitation)</u>

Plusieurs options de transformation sont testées impliquant un changement d'essence : portant sur le choix de l'essence plantée (feuillus ou résineux) et sur le niveau de production (ou productivité) de bois de l'essence de plantation, traduite par des variantes sur la fertilité.

Le scénario de référence correspond à l'évolution naturelle d'un taillis capitalisé non exploité avec différentes possibilités de courbes de dépérissements.

Pour cette famille de scénarios, les éventuelles variations de carbone dans les sols ne sont pas considérées. La revue de la bibliographie ne nous a pas permis de quantifier les éventuels impacts d'une récolte partielle (70 %) des menus bois. Le scénario de transformation du taillis par plantation pourrait avoir une incidence négative à court terme liée à la coupe totale

associée à un travail du sol. La bibliographie ne nous a pas permis cependant de quantifier les éventuels impacts à court terme.

2.1.2. Scénarios relatifs aux produits annexes à la récolte de bois d'œuvre

Nous étudions ici l'impact de la récolte pour l'énergie de produits annexes à une exploitation pour du bois matériau sur des systèmes de futaies. La récolte de menus bois/souches/houppier et éclaircies est comparée à des scénarios de référence où la récolte de ces coproduits n'a pas lieu sur la parcelle (c'est-à-dire que ces produits restent en forêt et s'y décomposent). La récolte de bois d'œuvre ou bois d'industrie n'intervient pas dans nos calculs car elle reste identique entre le scénario de référence et le scénario projet.

Récolte des menus bois

Cet ensemble de scénarios évalue l'impact sur la séquestration de carbone en forêt de la récolte des menus bois (en éclaircies, en coupe finale ou en coupe rase) par rapport au scénario de référence consistant à les laisser en forêt. L'enjeu est de tester différents pourcentages de récolte de menus bois (70 %, 100 %), et différents taux de dégradation (moyenne, forte et faible) du bois mort pour les menus bois laissés en forêt. Différentes essences (résineux/feuillus) ont également été testées.

La récolte spécifique des menus bois par séparation d'avec le bois d'industrie ou bois d'énergie (BIBE) n'est pas réalisée actuellement car non rentable : la récolte des menus bois se fait donc via une récolte de l'arbre entier ou du houppier entier. Le choix d'un scénario où la découpe est faite et le BIBE utilisé de la même façon dans le scénario de projet et le scénario de référence permet cependant d'évaluer de manière isolée l'action de ramasser les menus bois. La récolte de 100 % des menus bois correspond à un scénario théorique puisqu'il est impossible techniquement de récolter plus de 90 % des menus bois.

Récolte du houppier : compartiment BIBE et 70 % du menus bois (bois de la tige de plus faible diamètre, branches et 70 % des menus bois)

La récolte uniquement des menus bois pour l'énergie n'est pas une pratique courante. L'enjeu ici est donc de tester la récolte de l'ensemble du compartiment BIBE (houppier et tiges de plus faible diamètre) par rapport au scénario consistant à les laisser se dégrader en forêt après la récolte du bois d'œuvre. Le scénario de récolte de houppier et bois de la tige de plus faible diamètre en futaie est très représentatif : 32 % de la récolte actuelle de bois énergie est issue du houppier lorsque l'on évalue la part des différents modes de récolte, et 26 % est issue des éclaircies et dépressage (voir Annexe 18). Ce scénario a uniquement été testé pour une futaie de résineux et concerne les récoltes réalisées en éclaircies et en coupe rase. Différents taux de dégradation ont été testés. La récolte du BIBE issu des éclaircies et houppiers est traditionnellement réalisée soit pour le matériau soit pour l'énergie. Un scénario de référence utilisation matière (afin d'analyser le bilan de l'utilisation énergétique versus utilisation matière) reste en dehors du périmètre de l'étude.

Récolte des souches

Ce scénario évalue l'impact de la récolte des souches par rapport au scénario consistant à les laisser en forêt. Différents taux de dégradation des souches ont été testés. Ce scénario a uniquement été testé pour une futaie de résineux.

Le scénario de récolte des souches est peu représentatif de la récolte actuelle (2 % de la récolte)(voir Annexe 18). Cette récolte est surtout réalisée sous contraintes sanitaires.

Pour les scénarios menus bois et souches, une perte de 5 %[146] du carbone du sol a été prise en compte en analyse de sensibilité sur la modélisation à 100 ans (non prise en compte dans les résultats à 30 ans). La revue de la bibliographie ne nous a pas permis de quantifier les éventuels impacts d'une récolte partielle (70 %) des menus bois ou ses éventuels impacts sur le court terme.

2.1.3. Scénarios relatifs aux plantations sur déprises agricoles

L'enjeu est d'évaluer l'impact sur la séquestration de carbone en forêt de la réalisation de plantations sur des terres non boisées en déprise agricole. En effet, il y a eu une forte augmentation de ce type de surface et cette tendance se maintient, même si son rythme se réduit. Différents types de plantations ont été testés (taillis à courte rotation, futaie de résineux, futaie de feuillus). Les plantations de futaies sont motivées par la production combinée de bois matériau et de bois énergie, mis à part les taillis à courte rotation (TCR) qui ont une vocation uniquement énergétique.

Le scénario de référence correspond à une terre agricole laissée à l'abandon avec une colonisation lente de la parcelle par un boisement spontané. Une analyse de sensibilité par rapport au taux de croissance du boisement spontané a été réalisée. Il faut noter que le scénario de référence correspond à une zone en déprise agricole et non pas à la continuité d'une culture

[146] L'étude Achat et al. (2018), montre une perte de 5 % du carbone du sol sur 100 ans pour le douglas pour la récolte en arbre entier par rapport au standard.

agricole : l'étude n'a pas pour objectif d'évaluer l'impact climatique d'un passage d'un usage agricole à une forêt en prenant en compte les éventuelles concurrences avec une production alimentaire.

On peut noter que les scénarios de TCR sont prospectifs. La représentativité des surfaces de plantation sur déprise agricole de futaie résineuse ou feuillue n'a pas été évaluée. Pour cette famille de scénarios, les éventuelles variations de carbone dans les sols entre le scénario de référence et le scénario projet ne sont pas considérées, car sur les deux scénarios une forêt sera développée[147].

2.2. Présentation des modèles utilisés

Les scénarios projets et les scénarios de référence présentés portent sur :

- l'exploitation et l'amélioration des taillis en croissance (voir section 3 Figure 58) ;
- la transformation des taillis capitalisés (voir section 3 Figure 59) ;
- la collecte des menus bois/houppier et tige de faible diamètre et des souches dans les futaies résineuses (voir section 4 Figure 81 et Figure 82) ;
- la collecte des menus bois en futaie feuillue (voir section 4 Figure 81) ;
- le reboisement des terres en déprise agricole (voir section 5 Figure 97).

L'essence choisie pour la modélisation des taillis est le châtaignier, la futaie résineuse correspond à une futaie de douglas et la futaie feuillue est modélisée comme une futaie de chêne. Les TCR sont assimilés à des taillis à courte rotation d'eucalyptus. Au-delà du type de gestion sylvicole, la productivité de la forêt est liée à la nature de l'essence sélectionnée, à la fertilité du sol et à des conditions climatiques spécifiques. La grande diversité en essences (plus de 160 essences) et conditions pédoclimatiques de la forêt française rend complexe notre analyse basée sur des études de cas à l'échelle de la parcelle. À ce stade, nous avons choisi des essences productives (châtaignier pour le taillis, douglas pour la futaie résineuse et chêne pour la futaie de feuillus) qui sont traditionnellement exploitées et pour lesquelles nous disposions de modèles de croissance. Cependant, les variantes autour de la fertilité permettent de comprendre l'influence de la productivité de la forêt sur les résultats. Les variantes sur la fertilité de l'essence réalisées éclairent donc plus largement l'influence de la productivité de la forêt sur la question climatique.

Selon les espèces, des modèles différents ont été choisis : Fagacées sous CAPSIS complété par l'outil CAT pour le chêne ; OASIS pour le douglas également sous CAPSIS et CAT ; des tables de production sous Excel pour le châtaigner et pour l'eucalyptus, complétées par des modèles de stockage dans les produits. Cependant, les modèles de croissance n'étant pas adaptés à modéliser la « non gestion » (voir 8 « Limites et besoins de recherche complémentaires »), les données associées aux scénarios de référence sont issues : (1) pour les taillis, de dires d'experts, sur la base des analyses des données sur les stocks de carbone à l'ha de l'IGN dans les peuplements de châtaignier, auxquelles différents niveaux de dépérissement ont été appliqués ; (2) des modèles de décomposition du bois mort pour les scénarios de référence des produits annexes à la récolte du bois d'œuvre ; (3) des hypothèses de croissance des boisements spontanés utilisées dans la méthodologie du Label bas-carbone, et en plus pour le scénario TCR, un modèle de croissance d'un taillis de bouleau, utilisé en sensibilité.

Une description plus précise de l'ensemble des scénarios est donnée en annexe : annexe 13 pour la modélisation des stocks de biomasse vivante incluant les paramètres des modèles de croissance, de matière organique porte et dans les produits ; annexe 14 pour la description de chaque scénario ; annexe 17 pour la liste complète des scénarios.

Les hypothèses telles que les paramètres des modèles de croissance ont une influence importante sur les résultats. Dans une moindre mesure, les moyens techniques utilisés pour le calcul des stocks moyens ont également une influence. Ainsi les modèles sous CAPSIS et CAT produisent des données sur des pas de temps pouvant dépasser les 10 ans. Les calculs réalisés pour le stock sur une révolution sont exacts car réalisés directement par CAT. Par contre, les calculs réalisés à 30 et à 100 ans ainsi que les graphes sont réalisés sur Excel et il est nécessaire alors d'extrapoler les stocks entre deux valeurs données par CAT. Afin de donner des stocks plus réalistes pour le bois énergie, le choix a été fait de modéliser les stocks de manière conservatrice. Entre deux données de stocks fournies au temps t_1 et t_2 par CAT, le stock de l'année suivant t_1, soit t_1+1, est la donnée de stock à t_2 et non pas une extrapolation linéaire entre les stocks de t_1 et t_2. Ceci explique les pics de stock de produits observés lorsque la totalité de la récolte est utilisée en bois énergie et qui explique que les stocks produits associés au bois énergie ne sont pas tout à fait nuls. Cela peut illustrer le fait que le bois énergie peut être stocké sur des durées plus ou moins longues avant son utilisation en chaudière. Dans le cas où une partie des bois récoltés sont utilisés en matériau, les pics observés sont un peu moins visibles mais sous-estimés. Ces pics peuvent être également observés pour des stocks de faible durée comme la matière organique morte. En dehors de ce problème d'extrapolation, si une récolte a lieu l'année n et

[147] Le développement d'une forêt (que ce soit par boisement spontané ou par plantation) sur une ancienne terre agricole cultivée conduit à une augmentation de carbone dans les sols. Si le développement de la forêt a lieu sur une prairie, l'augmentation de stock n'est pas attendue car les stocks de carbone des sols des prairies sont similaires à ceux des forêts.

qu'elle est entièrement utilisée en bois énergie, le stock moyen sous Excel est calculé en prenant l'aire du triangle entre le stock à l'année n-1, soit 0, la récolte à l'année, et le stock à l'année n+1, soit 0 de nouveau divisé par l'horizon de temps considéré : le stock moyen, même pour le bois énergie, est donc non nul.

Comme expliqué en section 0 de la présente partie, les stocks « à l'équilibre » ou « à l'infini » correspondent aux stocks moyens sur une révolution si la gestion sylvicole est cyclique. Pour les scénarios modélisés dans CAT, ce calcul est réalisé de manière exacte. Pour les scénarios modélisés sous Excel et pour les scénarios dont la gestion sylvicole ne correspond pas à une gestion cyclique, il s'agit des stocks moyens sur une période de 200 ans ce qui constitue une limite de l'étude.

Les infradensités (tonnes de matière sèche par m³ de bois) utilisées dans l'étude correspondent aux essences étudiées et non pas à des moyennes comme ce qui est fait pour des référentiels tels que le calcul des indicateurs de gestion durable de la forêt ou le Label bas-carbone. Ce choix rend les résultats de l'étude plus spécifiques aux scénarios étudiés.

Pour les variations de carbone dans les sols, cette estimation se base sur une revue de la littérature. Celle-ci montre que les coupes conventionnelles (récolte uniquement du bois fort) n'engendrent pas ou peu de perte de carbone dans les sols. En revanche la récolte de l'arbre entier (intégrant les menus bois et/ou souches) aurait une incidence négative sur les stocks de carbone des sols. Selon la revue bibliographique, le renouvellement par régénération naturelle ne modifie pas sensiblement le stock de carbone du sol. En revanche, une coupe mettant le sol à nu associé à un travail du sol et renouvellement par plantation peut avoir des incidences négatives à court terme, même si à long terme les stocks se reconstituent (voir annexe 16).

3. Présentation des résultats relatifs aux taillis

Les scénarios étudient la récolte de bois énergie à partir de la mise en gestion des taillis de châtaignier à différents stades de maturité, pour différentes classes de fertilité et pour différents équilibres entre les usages du bois en sortie de la forêt. Trois types de scénarios sont étudiés : la mise en exploitation des taillis maintenant le système de taillis, leur amélioration en futaie ainsi que la transformation en futaie résineuse ou feuillue.

Les figures suivantes présentent les connexions entre les différents scénarios et introduisent les nomenclatures permettant de les identifier.

Figure 58 : Scénarios de gestion des taillis en croissance

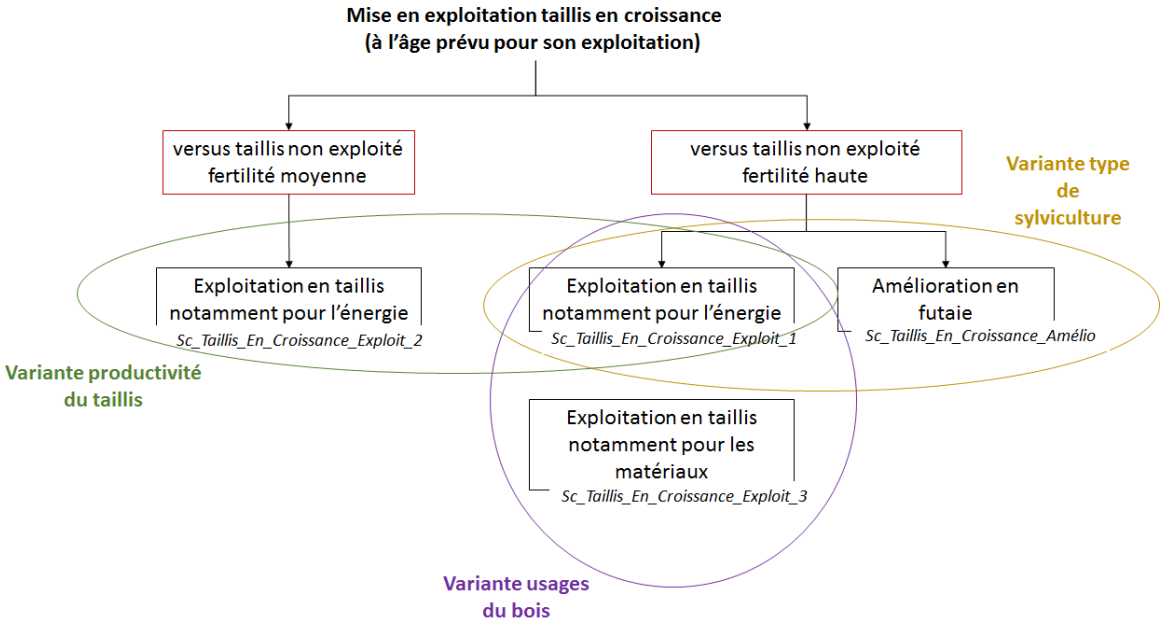
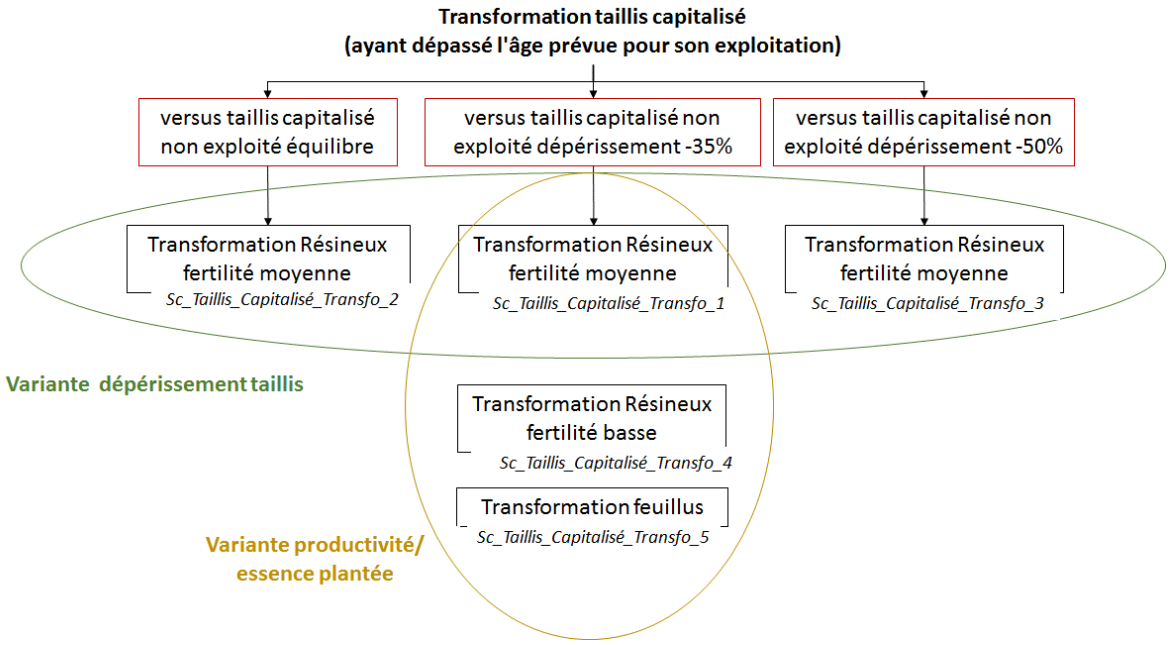


Figure 59 : Scénarios de transformation des taillis capitalisés



Les scénarios de référence correspondent à l'évolution naturelle sans exploitation de ce système de taillis, avec différentes hypothèses d'évolution des stocks de carbone sur la parcelle. La mise en gestion de ce type de peuplement permet de maximiser la production de bois et de limiter la mortalité naturelle et le dépérissement. L'évolution des stocks de carbone dans les scénarios de référence pour les taillis est calculée en intégrant donc une réduction de la production dans les taillis en croissance non exploités et une stagnation ou une diminution du stock de carbone sur pied par dépérissement lorsque le taillis non exploité est capitalisé. Les données associées aux scénarios de référence sont issues, de dires d'experts, sur la base des analyses des données sur les stocks de carbone à l'ha de l'IGN dans les peuplements de châtaignier, auxquelles différents niveaux de dépérissement ont été appliqués.

Les scénarios de référence des scénarios associés aux taillis en croissance correspondent à des taillis qui continuent de croître à un rythme plus faible, atteignant un stock maximal, puis qui subissent un dépérissement pour finalement atteindre à long terme un stock stable (accroissement égal à la mortalité), ceci pour deux niveaux de fertilité.

Figure 60 : Scénarios de référence pour les taillis en croissance de fertilité haute – stocks en forêt (tC/ha)

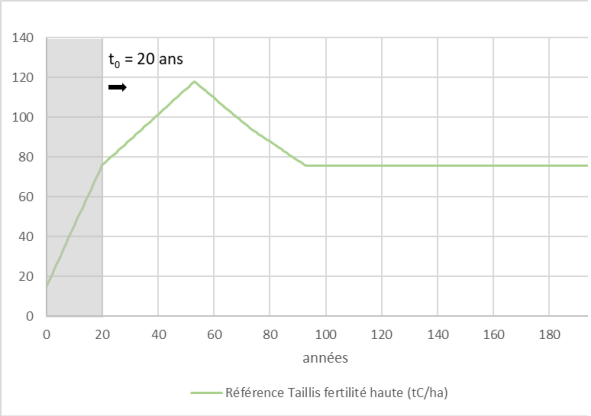
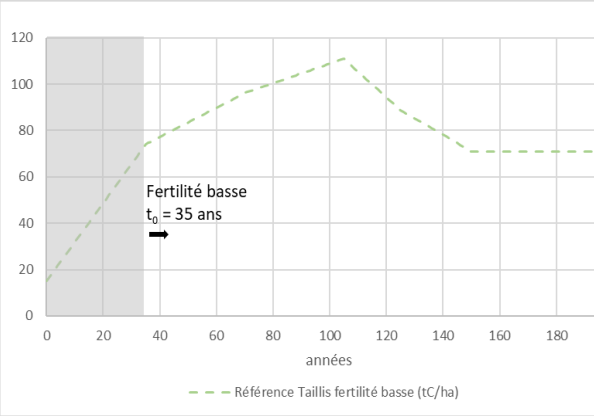


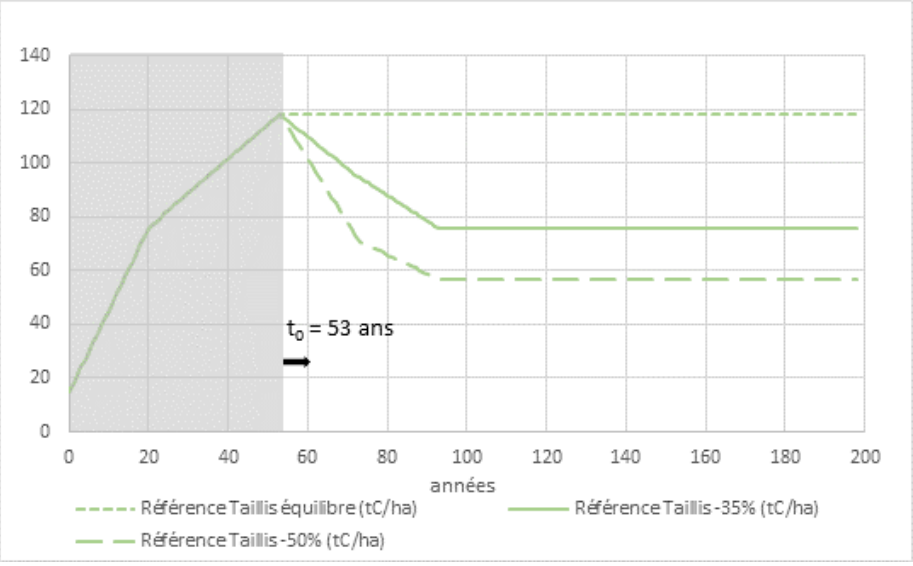
Figure 61 : Scénarios de référence pour les taillis en croissance de fertilité basse – stocks en forêt (tC/ha)



Le temps « t_0 » correspond au moment où le scénario projet commence à être différent du scénario de référence pour la parcelle.

Les scénarios de référence des scénarios associés aux taillis capitalisés correspondent à des taillis qui dépérissent avec différents niveaux de dépérissement pour atteindre un stock stable (accroissement égal à la mortalité).

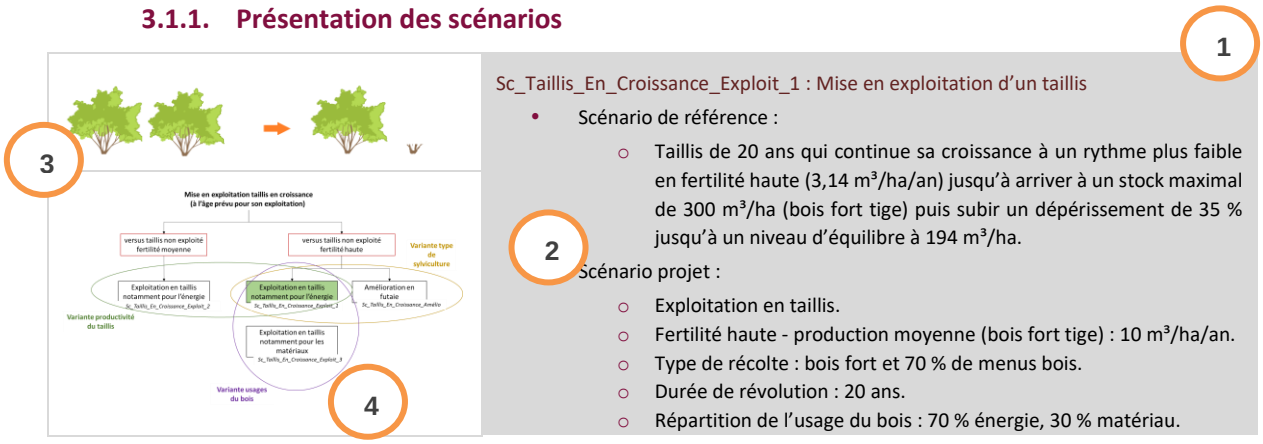
Figure 62 : Scénarios de référence pour les taillis capitalisés– stocks en forêt (tC/ha)



3.1. Mise en exploitation des taillis en maintenant le système de taillis

Trois scénarios sont étudiés pour la mise en exploitation des taillis : un taillis en croissance de fertilité haute où le bois est utilisé majoritairement pour l'énergie (Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1) avec deux variantes : un scénario où la fertilité est plus basse (Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2) et un scénario où le bois est principalement utilisé en matériau (Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3).

3.1.1. Présentation des scénarios



Chaque scénario est présenté à l'aide d'un cartouche présentant les éléments suivants :

1 *Le titre du scénario*

2 *Les principales caractéristiques du scénario projet et du scénario de référence*

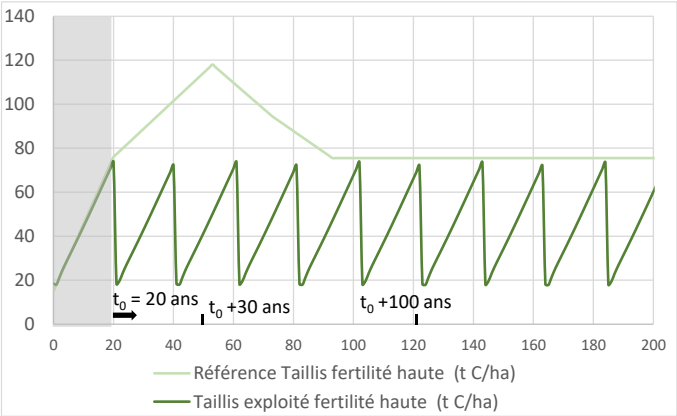
3 *Un pictogramme représentant le scénario*

4 *Le positionnement du scénario par rapport aux autres variantes étudiées présentées dans la ou les figures de présentation générale des scénarios.*

Des graphes présentent ensuite les scénarios par l'évolution du stock de carbone en forêt et dans les produits de manière séparée pour plus de lisibilité pour le scénario de référence et pour le scénario étudié. Un graphe présentant la part d'évolution du stock de carbone en forêt correspondant à la matière organique morte est présenté pour certains scénarios. Des graphes réunissant les stocks en forêt et dans les produits sont présentés dans l'annexe 14.

Figure 63 : Stocks en forêt, scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1

On peut observer que le stock de carbone en forêt du scénario de

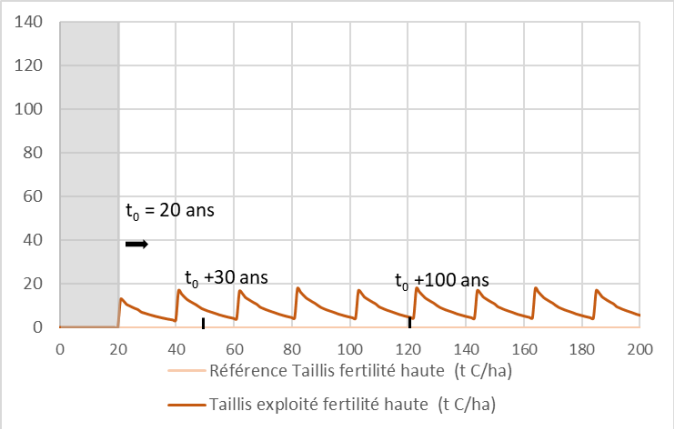


référence est supérieur au stock du taillis étudié quel que soit l'horizon de temps.

En régime permanent, le stock moyen du scénario étudié est de 44 tC/ha pour une moyenne de 83 tC/ha pour le scénario de référence.

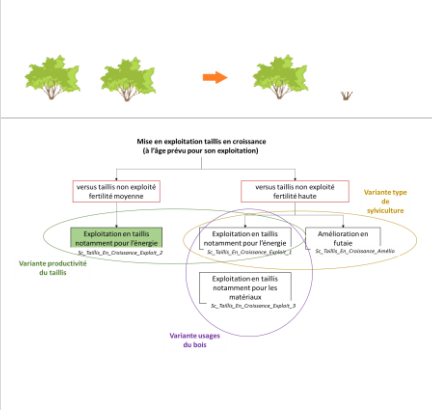
Le stock moyen dans les produits est faible (9 tC/ha à l'horizon de temps infini) du fait de l'utilisation majoritaire du bois issu du taillis en énergie (70 %) et des produits à durée de vie moyenne (30 % de piquets ayant une durée de vie de 15 ans).

Figure 64 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1



Le scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1 correspond à la mise en exploitation d'un taillis en croissance de classe de fertilité 2 par rapport à un scénario de référence où le taillis continue sa croissance puis subit un dépérissement. Le bois récolté est utilisé, en volume, à 70 % pour l'énergie et à 30 % pour un usage matériau, à savoir ici des piquets.

Variante sur la productivité du taillis (via la fertilité) :



Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2 : Variante sur la fertilité

- Scénario de référence :
  - Taillis de 35 ans qui continue sa croissance à un rythme plus faible en fertilité moyenne (1,6 m³/ha/an), atteint un stock maximal à 285 m³/ha, (bois fort tige) puis subir un dépérissement de 35 % jusqu'à un niveau d'équilibre à 180 m³/ha.
- Scénario projet :
  - Exploitation en taillis.
  - Fertilité moyenne - production moyenne (bois fort tige) : 5,5 m³/ha/an.
  - Type de récolte : bois fort et 70 % de menus bois.
  - Durée de révolution : 35 ans.
  - Répartition de l'usage du bois : 70 % énergie, 30 % matériau

Le scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2 représente une variante du scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1 mais dans le cas d'un taillis à fertilité plus basse. Le scénario de référence correspond à un taillis qui continue sa croissance puis subit un dépérissement. Le bois récolté est utilisé à 70 % pour l'énergie et à 30 % pour des piquets. La durée de révolution passe de 20 à 35 ans du fait de la différence de fertilité.

Figure 65 : Stocks en forêt, scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2

Comme dans les scénarios précédents, le stock de carbone en forêt du scénario de

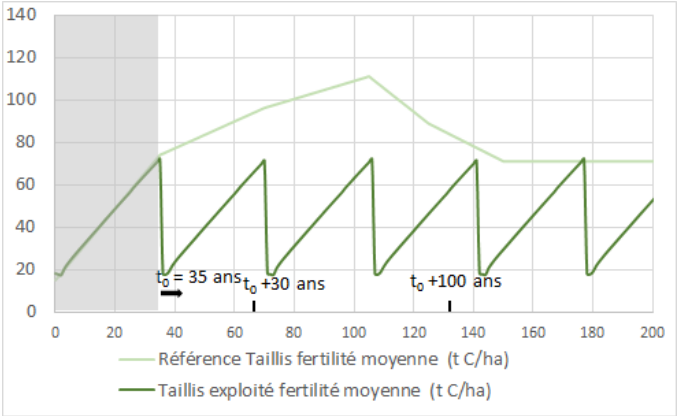
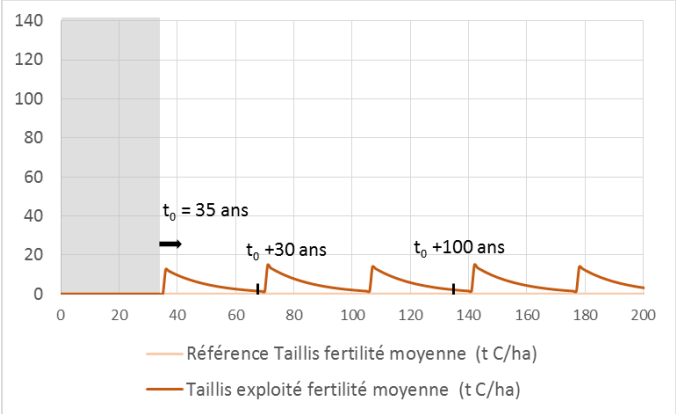


Figure 66 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2

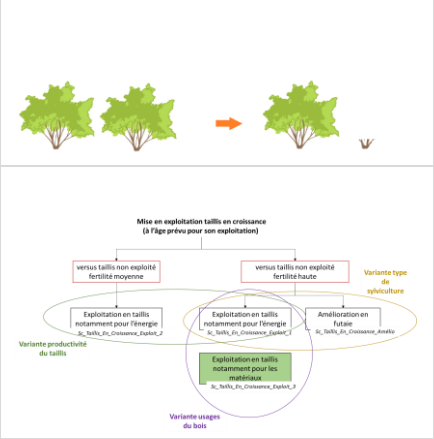
référence est supérieur au stock du taillis étudié quel que soit l'horizon de temps.

En régime permanent, le stock moyen du scénario étudié est de 43 tC/ha pour une moyenne de 83 tC/ha pour le scénario de référence.

Le stock moyen dans les produits est plus faible (6 tC/ha en régime permanent) que dans le scénario avec une meilleure fertilité. En effet, l'allongement de la révolution entraîne un niveau de stock minimum dans les produits plus faible ce qui fait baisser le stock moyen.



Variante sur l'utilisation du bois récolté (répartition bois énergie/bois matériau) :



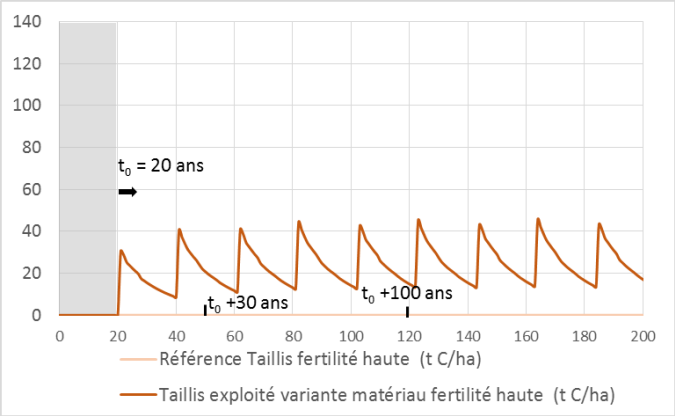
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3 : Variante sur l'utilisation du bois récolté

- Scénario de référence :
  - Taillis de 20 ans qui continue sa croissance à un rythme plus faible en fertilité haute (3,14 m³/ha/an) jusqu'à arriver à un stock maximal de 300 m³/ha (bois fort tige) puis subir un dépérissement de 35 % jusqu'à un niveau d'équilibre à 194 m³/ha.
- Scénario projet :
  - Exploitation en taillis.
  - Fertilité haute - production moyenne (bois fort tige) : 10 m³/ha/an.
  - Durée de révolution : 20 ans.
  - Type de récolte : bois fort et 70 % de menus bois.
  - Répartition de l'usage du bois : 30 % énergie, 70 % matériau (65 % piquets et 5 % parquet).

Le scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3 est similaire au scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1 mais le bois récolté est utilisé en majorité en matériau : piquets de vigne (65 %), parquets (5 %), le reste étant utilisé en énergie. Ainsi, l'évolution du stock en forêt par rapport au scénario de référence est similaire mais l'évolution du stock dans les produits est différente comme le montre la figure ci-dessous.

Le stock dans les produits est supérieur au stock observé dans le scénario précédent du fait de l'utilisation majoritaire en bois matériau. Le stock moyen en régime permanent est égal à 24 tC/ha.

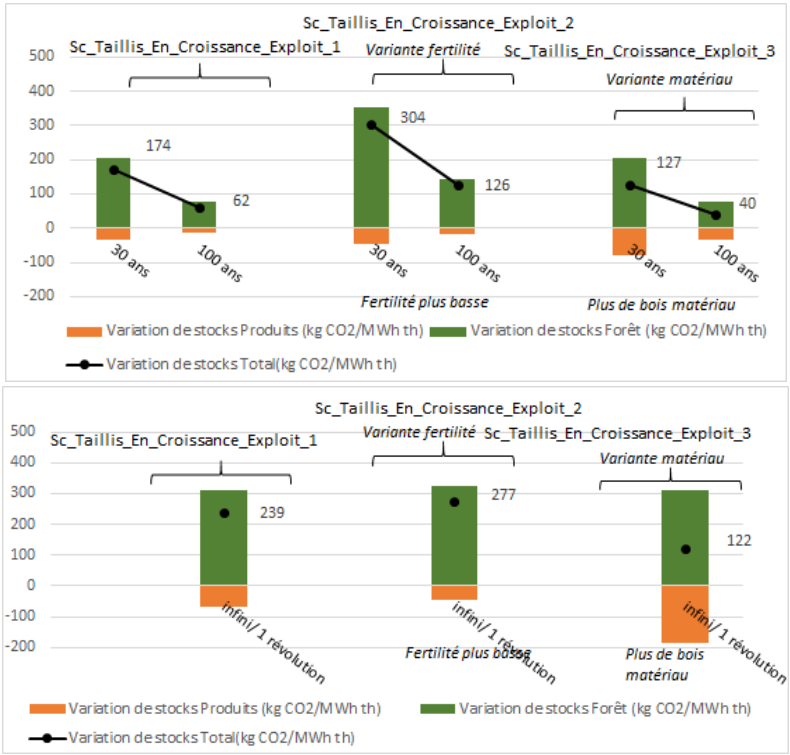
Figure 67 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3



3.1.2. Résultats

La figure à gauche présente les résultats de l'indicateur de conversion ILCD pour les 3 scénarios et pour les deux horizons de temps (30 ans et 100 ans). La figure à droite présente les résultats de l'indicateur ILCD en régime permanent à l'infini (stock moyen d'une révolution pour le scénario projet et stock moyen sur 200 ans pour le scénario de référence) rapporté à la récolte en bois d'une révolution.

Figure 68 : Résultats de l'indicateur ILCD pour les scénarios d'exploitation des taillis en croissance



La barre verte représente la variation de stock en forêt entre les deux scénarios à l'horizon 30 ans, 100 ans (1er graphe) et en régime permanent à l'infini (2ème graphe) divisé par le différentiel de récolte de bois énergie à l'horizon 30 ans, 100 ans (1er graphe) et sur une révolution (2ème graphe). La barre marron représente le ratio équivalent mais pour la variation de stock dans les produits. Le point noir correspond au total des deux ratios.

3.1.3. Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats doit se faire en tenant compte des limites de l'étude relatives à la méthode et aux données disponibles (voir section 8).

L'ensemble des scénarios étudiés ont un stock moyen en forêt plus faible que le stock du scénario de référence (les barres vertes dans la figure ci-dessus sont au-dessus de 0). Par contre, les stocks moyens dans les produits sont plus élevés dans les scénarios étudiés par rapport aux scénarios de référence (les barres marrons dans la figure ci-dessus sont au-dessous de 0).

Les trois scénarios d'exploitation des taillis impliquent des émissions de gaz à effet de serre pour les trois horizons de temps : la somme des stocks dans les produits et en forêt du scénario étudié est toujours inférieure au stock en forêt du scénario de référence (les points noirs totalisant le différentiel de stock moyen en forêt et dans les produits - somme des barres vertes et marrons dans la figure ci-dessus - sont au-dessus de 0).

L'horizon de temps est important : l'impact à 100 ans est deux à trois fois plus faible que l'impact à 30 ans.

La productivité du taillis (modélisée ici à travers une variante sur la fertilité) est également un paramètre important : plus le taillis exploité est productif, plus la récolte de bois sera importante et donc plus l'impact rapporté au m³ de bois prélevé sera faible (les points noirs de la figure ci-dessus correspondant au scénario Sc_Taillis_en_Croissance_Exploit_1 modélisant une fertilité élevée sont au-dessous des points noirs correspondant au scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2 modélisant une fertilité plus basse).

Enfin, l'utilisation plus importante du bois récolté en bois matériau (passage de 30 % à 70 %) par rapport au bois destiné à l'énergie entraine une diminution de l'indicateur significative de l'ordre de 30 % grâce aux stocks dans les produits (l'indicateur de différentiel de stock total - point noir - est de 62 kg CO_2 eq./MWh_{th} pour l'utilisation majoritairement énergie contre 40 kg CO_2 eq./MWh à l'horizon 100 ans pour l'utilisation majoritairement matériau).

Le calcul réalisé en considérant un stock moyen en régime permanent (stock moyen d'une révolution pour le scénario projet et stock moyen sur 200 ans pour le scénario de référence) divisé par la récolte sur une révolution attribue l'impact du changement de pratique sylvicole à la première révolution : il exprime dans ces scénarios un impact supérieur à celui de l'horizon de temps de 100 ans et est proche en ordre de grandeur ou supérieur à celui de l'horizon de 30 ans.

3.1.4. Tableau de résultats

Les résultats chiffrés sont présentés dans le tableau suivant en kg CO_2/MWh th et kg CO_2/m³:

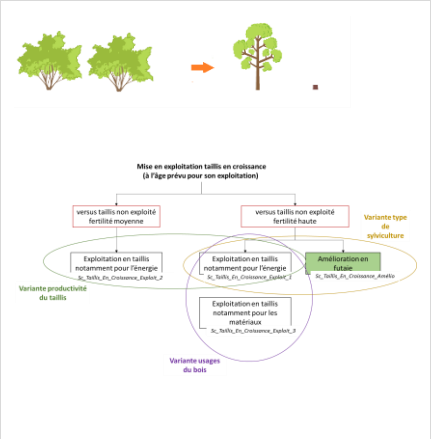
Tableau 105 : Résultats pour l'exploitation des taillis en croissance

		Variation de stocks (kg CO_2/MWh_{th})			Variation de stocks (kg CO_2/m³)		
Nom scénario	Horizon de temps pour le calcul du stock moyen	Forêt	Produits	Total	Forêt	Produits	Total
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1	30 ans	206	-32,3	173,6	420	-66,0	354,1
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1	100 ans	75,6	-13,7	61,9	154	-28,0	126,2
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1	Régime permanent/ 1 révolution	309	-70,2	239,2	631	- 143	487,9
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2	30 ans	353	-48,4	304,4	720	-98,7	620,9
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2	100 ans	141	-15,5	125,7	288	-31,7	256,4
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2	Régime permanent/ 1 révolution	323	-46,6	276,6	659	-95,1	564,3
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3	30 ans	206	-78,9	127,1	420	- 161	259,2
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3	100 ans	75,6	-35,5	40,1	154	-72,5	81,7
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3	Régime permanent/ 1 révolution	309	- 187	122,0	631	- 382	248,7

L'ensemble des résultats est présenté en Annexe 15 du rapport.

3.2. Amélioration des taillis vers des futaies

3.2.1. Présentation du scénario

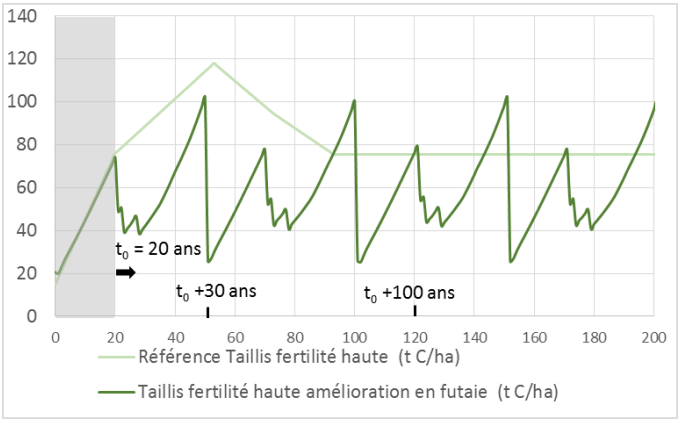


Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio : Amélioration d'un taillis

- Scénario de référence :
  - Taillis de 20 ans qui continue sa croissance en fertilité haute (3,14 m³/ha/an) jusqu'à arriver à un stock maximal de 300 m³/ha (bois fort tige) puis subit un dépérissement de 35 % jusqu'à un niveau d'équilibre à 194 m³/ha.
- Scénario projet :
  - Amélioration du taillis en futaie.
  - Fertilité haute - production moyenne (bois fort tige) : 9 m³/ha/an.
  - Durée de révolution : 50 ans.
  - Produits récoltés : bois fort et 70 % des menus bois.
  - Utilisation du bois : 100 % en énergie pour 1ère et 2ème éclaircie, 65 % en bardage et 35 % en énergie pour la 3ème éclaircie et 90 % en bardage et 10 % en énergie pour la coupe finale.

Un seul scénario est étudié pour la mise en exploitation par conversion des taillis « bien venants » en futaies. Le scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio correspond à l'amélioration d'un taillis en croissance de classe de fertilité haute : trois éclaircies sont pratiquées entre 20 et 35 ans avant une coupe définitive à 50 ans. Le scénario de référence correspond à un taillis qui continue sa croissance sans éclaircie puis subit un dépérissement. Le bois récolté est utilisé à 100 % pour l'énergie pour la première et la seconde éclaircie, à 65 % en bardage et 35 % en énergie pour la troisième éclaircie et à 90 % en bardage et 10 % en bois énergie pour la coupe définitive (voir Tableau 160 en annexe 13.3).

Figure 69 : Stocks en forêt, scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio

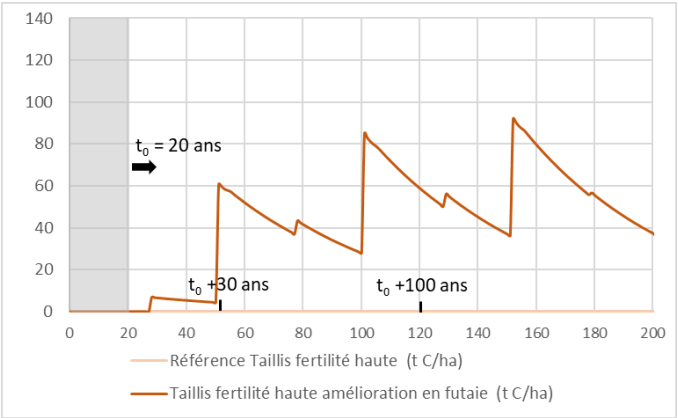


On peut observer que le stock de carbone en forêt du scénario de référence est supérieur au stock du taillis étudié durant les premières années après la première éclaircie, puis la différence se réduit.

En régime permanent, le stock moyen du scénario étudié est de 57 tC/ha pour une moyenne de 83 tC/ha pour le scénario de référence.

L'amélioration en futaie permet d'augmenter de manière significative les stocks moyens dans les produits (48 tC/ha) par rapport à un scénario d'exploitation en taillis.

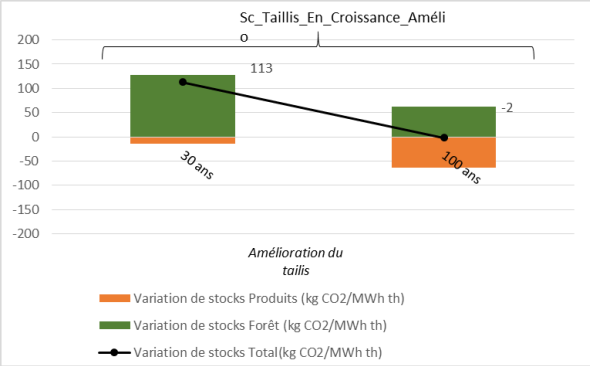
Figure 70 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio

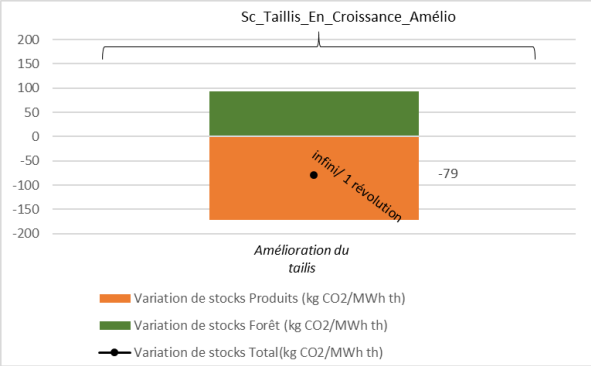


3.2.2. Résultats

La figure suivante présente les résultats de l'indicateur de conversion ILCD pour le scénario d'amélioration pour les deux horizons du temps (30 ans et 100 ans) dans le graphique de gauche et en régime permanent dans le graphique de droite.

Figure 71 : Résultats de l'indicateur ILCD pour les scénarios d'amélioration des taillis





La barre verte représente la variation de stock en forêt entre les deux scénarios à l'horizon 30 ans, 100 ans (1er graphe) et en régime permanent à l'infini (2ème graphe) divisé par le différentiel de récolte de bois énergie à l'horizon 30 ans, 100 ans (1er graphe) et sur une révolution (2ème graphe). La barre marron représente le ratio équivalent mais pour la variation de stock dans les produits. Le point noir correspond au total des deux ratios.

3.2.3. Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats doit se faire en tenant compte des limites de l'étude relatives à la méthode et aux données disponibles (voir section 8).

À 100 ans, l'amélioration maintient le même niveau de stock (en intégrant la forêt et les produits bois) que le scénario de référence. Le bilan est donc « neutre », et le point noir de la figure ci-dessus est égal à 0 à 100 ans. À court terme, le calcul effectué conduit à une émission de gaz à effet de serre : les stocks du scénario de référence sont supérieurs aux stocks du scénario projet.,

Pour compléter cette approche, le calcul ILCD divisant les différences de stocks en régime permanent à l'infini (stock moyen d'une révolution pour le scénario projet et stock moyen à 200 ans pour le scénario de référence) par la production de bois sur une rotation conduit à des émissions négatives de gaz à effet de serre notamment grâce aux produits bois.

3.2.4. Tableau de résultats

Les résultats chiffrés sont présentés dans le tableau suivant en kg CO_2/m^3 et kg CO_2/MWh_{th} :

Tableau 106 : Résultats pour l'amélioration des taillis

		Variation de stocks (kg CO_2/MWh_{th})			Variation de stocks (kg CO_2/m^3)		
Nom scénario	Horizon de temps pour le calcul du stock moyen	Forêt	Produits	Total	Forêt	Produits	Total
Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio	30 ans	128	-14,6	113	261	-30	231
Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio	100 ans	62,1	-63,6	-1,58	127	-130	-3
Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio	Régime permanent/ 1 révolution	93,2	- 172	-78,8	190	-351	-161

L'ensemble des résultats est présenté en annexe 15 du rapport.

3.3. Transformation des taillis

Différentes variantes sont étudiées pour la mise en gestion des taillis capitalisés par transformation en plantation:

Scénario de base :

- Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1 : Transformation d'un taillis capitalisé (mature) dépérissant (-35 %) en futaie résineuse de douglas de fertilité moyenne.

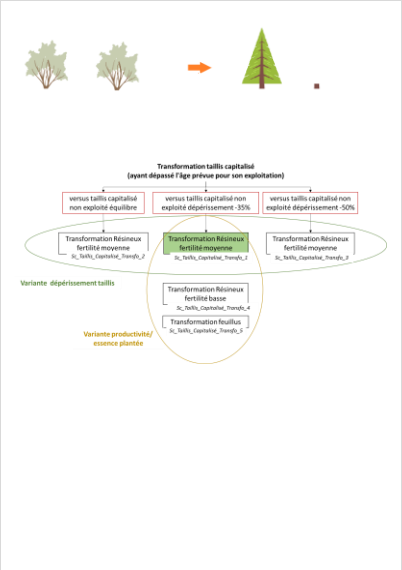
Variantes sur le niveau de dépérissement du taillis non exploité :

- Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2 : Transformation d'un taillis capitalisé (mature) à l'équilibre (sans dépérissement) en futaie résineuse de douglas de fertilité moyenne.
- Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3 : Transformation d'un taillis capitalisé (mature) fortement dépérissant (-50 %) en futaie résineuse de douglas de fertilité moyenne.

Variantes sur le niveau de production (via la fertilité) et l'essence de plantation :

- Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4 : Transformation d'un taillis capitalisé (mature) dépérissant (-35 %) en futaie résineuse de douglas de fertilité basse.
- Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5: Transformation d'un taillis capitalisé (mature) dépérissant (-35 %) en futaie de chêne de fertilité haute.

3.3.1. Présentation des scénarios

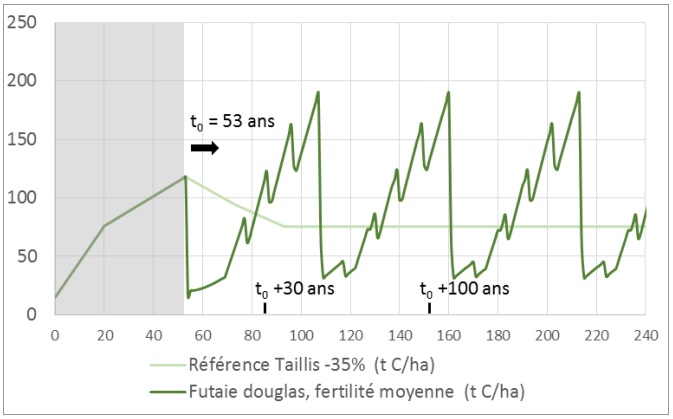


Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1 : Transformation d'un taillis capitalisé dépérissant (-35 %) en futaie résineuse de douglas de fertilité moyenne à haute

- Scénario de référence :
  - Taillis à 300 m³/ha qui subit un dépérissement (-2,6 m³/ha/an) (bois fort tige) pour attendre un stock à l'équilibre à 194 m³/ha.
- Scénario projet :
  - Exploitation du taillis, arasage des souches puis transformation en futaie de douglas.
  - Durée de la révolution de la futaie de douglas : 53 ans.
  - Fertilité moyenne à haute - Production moyenne (bois fort tige) : 19 m³/ha/an.
  - Produits récoltés : bois fort et 70 % des menus bois.
  - Utilisation du bois :
    - Du taillis : 70 % pour l'énergie et à 30 % pour des piquets.
    - De la plantation résineuse : 39 % en bois énergie, 24 % en construction, 17 % en emballage, 9 % en papier, 5 % en ameublement et 6 % en utilisation interne à la filière (énergie pour le séchage).

Le scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1 correspond à la transformation d'un taillis capitalisé dépérissant de fertilité haute en futaie régulière de douglas de fertilité moyenne à haute. Les produits du taillis sont utilisés à 70 % pour l'énergie et à 30 % pour des piquets. Les produits de la futaie de douglas sont utilisés à 39 % en bois énergie, à 24 % en construction, à 17 % en emballage, à 9 % en papier, à 5 % en ameublement et à 6 % en utilisation interne à la filière (séchage).

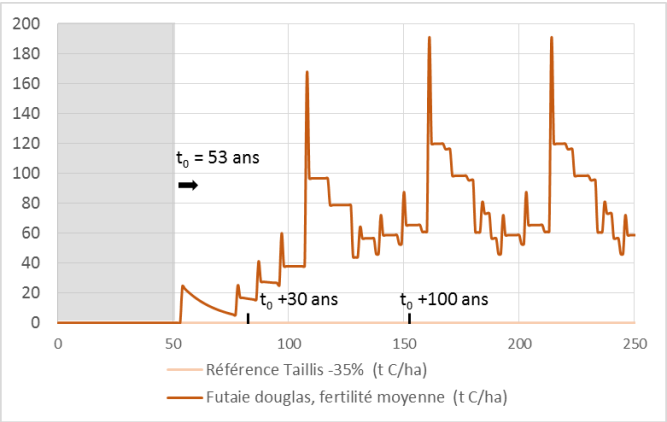
Figure 72 : Stocks en forêt, scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1



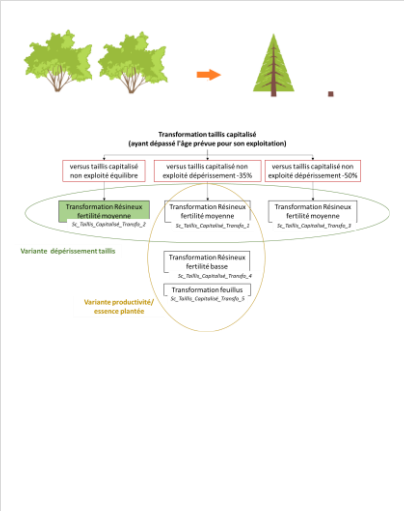
En régime permanent, le stock moyen du scénario étudié est légèrement supérieur au stock moyen du scénario de référence (de 87 tC/ha contre 80 tC/ha).

Le stock moyen dans les produits est important (63 tC/ha sur 200 ans) du fait de l'utilisation importante du bois issu de la futaie résineuse en construction.

Figure 73 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1



Variantes sur le niveau de dépérissement du taillis non exploité :

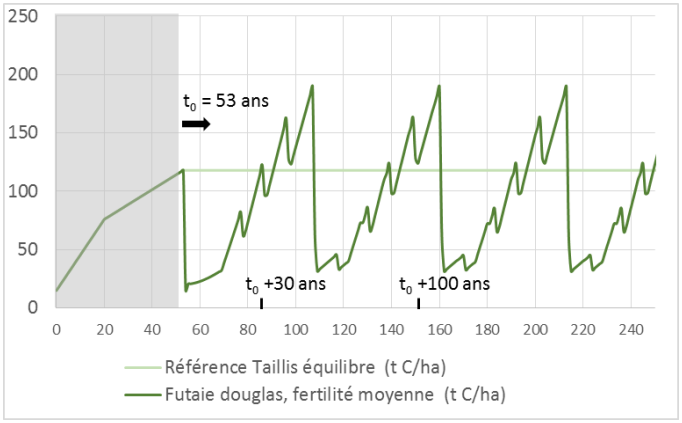


Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2 : Transformation d'un taillis capitalisé (mature) à l'équilibre en futaie de douglas de fertilité moyenne à haute

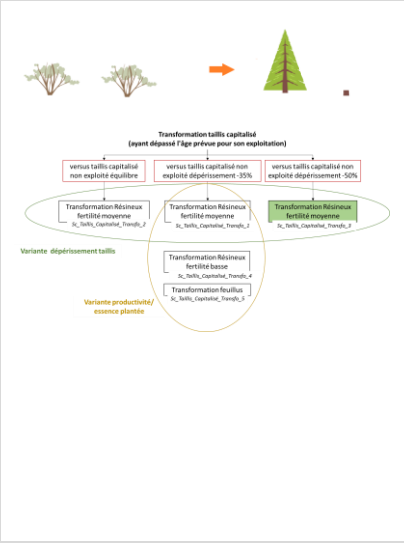
- Scénario de référence :
  - Taillis à l'équilibre à 300 m³/ha (bois fort tige).
- Scénario projet :
  - Exploitation du taillis, arasage des souches puis transformation en futaie de douglas.
  - Durée de la révolution de la futaie de douglas : 53 ans.
  - Fertilité moyenne à haute - Production moyenne (bois for tige) : 19 m³/ha/an.
  - Produits récoltés : bois fort et 70 % des menus bois.
  - Utilisation du bois :
    - Du taillis : 70 % pour l'énergie et à 30 % pour des piquets.
    - De la plantation de résineux : 39 % en bois énergie, 24 % en construction, 17 % en emballage, 9 % en papier, 5 % en ameublement et 6 % en utilisation interne à la filière (séchage).

Le scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2 est similaire au scénario précédent mais est comparé à un taillis à l'équilibre. Le différentiel de stock en forêt est affecté mais pas le différentiel de stock dans les produits.

Figure 74 : Stocks en forêt, scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2



En régime permanent, le stock moyen du scénario étudié est de 87 tC/ha pour une moyenne de 118 tC/ha pour le scénario de référence.

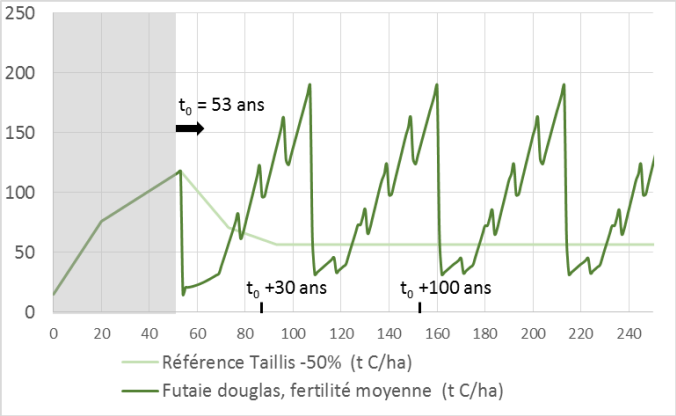


Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3 : Transformation d'un taillis capitalisé (mature) fortement dépérissant (-50%) en futaie résineuse de fertilité moyenne à haute

- Scénario de référence :
  - Taillis à 300 m³/ha, puis décroit fortement (-4,0 m³/ha/an) (bois fort tige) pour attendre à niveau d'équilibre à 133 m³/ha.
- Scénario projet :
  - Exploitation du taillis, arasage des souches puis transformation en futaie de douglas.
  - Durée de la révolution de la futaie de douglas : 53 ans.
  - Fertilité moyenne à haute - Production moyenne (bois fort tige) : 19 m³/ha/an.
  - Produits récoltés : bois fort et 70 % des menus bois.
  - Utilisation du bois :
    - Du taillis : 70 % pour l'énergie et à 30 % pour des piquets.
    - De la plantation de résineux : 39 % en bois énergie, 24 % en construction, 17 % en emballage, 9 % en papier, 5 % en ameublement et 6 % en utilisation interne à la filière (séchage).

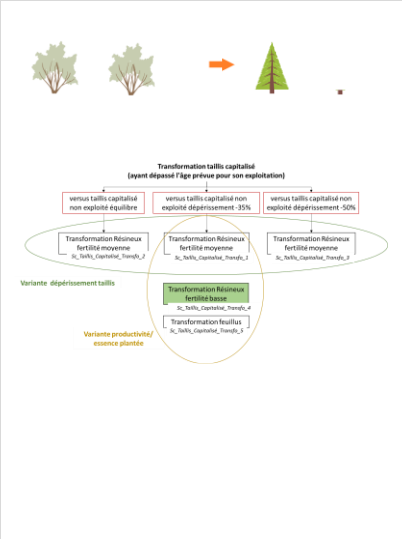
Le scénario Sc_Capitalisé_Transfo_3 se place dans le cas où la futaie résineuse de fertilité moyenne à haute serait plantée à la place d'un taillis fortement dépérissant comme le montre la figure suivante :

Figure 75 : Stocks en forêt, scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3



En régime permanent, le stock moyen du scénario étudié est supérieur au stock moyen du scénario de référence (de 87 tC/ha contre 61 tC/ha).

Variantes sur le niveau de production et l'essence de plantation :

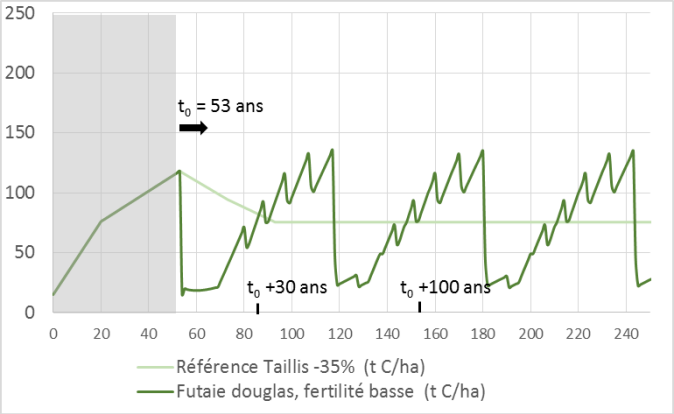


Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4 : Transformation d'un taillis capitalisé (mature) dépérissant (-35 %) en futaie résineuse douglas de fertilité basse à moyenne

- Scénario de référence :
  - Taillis à 300 m³/ha qui subit un dépérissement (-2,6 m³/ha/an) (bois fort tige) pour attendre un stock à l'équilibre à 194 m³/ha.
- Scénario projet :
  - Exploitation du taillis, arasage des souches puis transformation en futaie de douglas.
  - Durée de révolution de la futaie de douglas : 63 ans.
  - Fertilité basse à moyenne - Production moyenne (bois fort tige) : 13 m³/ha/an.
  - Produits récoltés : bois fort et 70 % des menus bois.
  - Utilisation du bois :
    - Du taillis : 70 % pour l'énergie et à 30 % pour des piquets.
    - De la plantation de résineux : 39 % en bois énergie, 24 % en construction, 17 % en emballage, 9 % en papier, 5 % en ameublement et 6 % en utilisation interne à la filière (séchage).

Le scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4 correspond à une transformation d'un taillis de fertilité basse à moyenne en croissance puis dépérissant en futaie de résineux de fertilité basse à moyenne. Le devenir des produits est le même que dans le scénario de base. Les stocks dans les produits et en forêt sont affectés comme le montrent les figures suivantes.

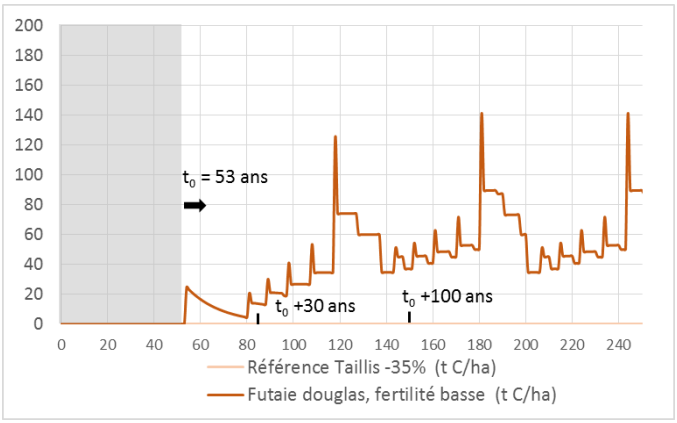
Figure 76 : Stocks en forêt, scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4

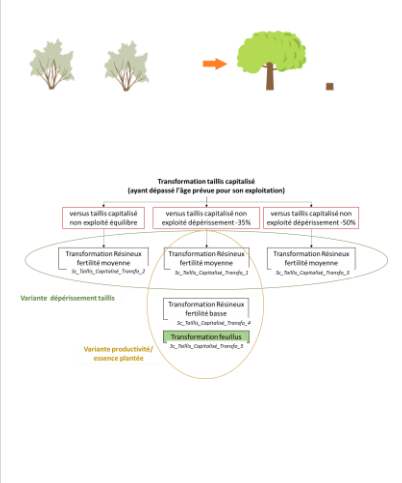


En régime permanent, le stock moyen du scénario étudié est de 71 tC/ha pour une moyenne de 80 tC/ha pour le scénario de référence.

Le stock moyen dans les produits est important (45 tC/ha en moyenne sur 200 ans) mais inférieur à celui issu d'une futaie résineuse de fertilité supérieure.

Figure 77: Stocks dans les produits, scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4



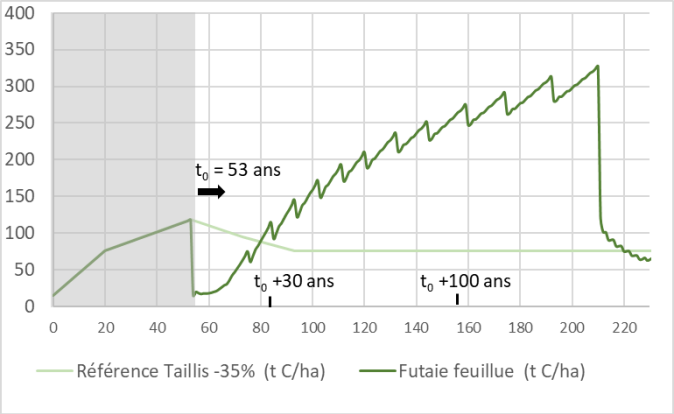


Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5 : Transformation d'un taillis capitalisé (mature) dépérissant (-35 %) en futaie de feuillue

- Scénario de référence :
  - Taillis à 300 m³/ha qui subit un dépérissement (-2,6 m³/ha/an) (bois fort tige) pour attendre un stock à l'équilibre à 194 m³/ha.
- Scénario projet :
  - Exploitation du taillis puis transformation en futaie feuillue.
  - Durée de révolution de la futaie feuillue : 170 ans.
  - Fertilité haute - Production moyenne (bois fort tige) : 9 m³/ha/an.
  - Produits récoltés : bois fort et 70 % des menus bois.
  - Utilisation du bois :
    - Du taillis : 70 % pour l'énergie et à 30 % pour des piquets.
    - De la plantation de feuillus : 62 % en énergie, 11 % en construction, 10 % en ameublement, 8 % en papier, 4 % en emballage et 4 % en énergie interne à la filière (séchage). 70 % des menus bois sont récoltés pour l'énergie.

Le scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5 correspond à la transformation d'un taillis dépérissant en une futaie feuillue de fertilité haute. Les produits issus de la futaie sont utilisés à 62 % en énergie, 11 % en construction, 10 % en ameublement, 8 % en papier, 4 % en emballage et 4 % en énergie interne à la filière (séchage). Le fort pourcentage de bois énergie s'explique par le modèle de billonnage (modèle qui oriente le bois vers différents usages selon sa qualité) utilisé et par la récolte de 70 % des menus bois et leur utilisation en énergie.

Figure 78 : Stocks en forêt, scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5



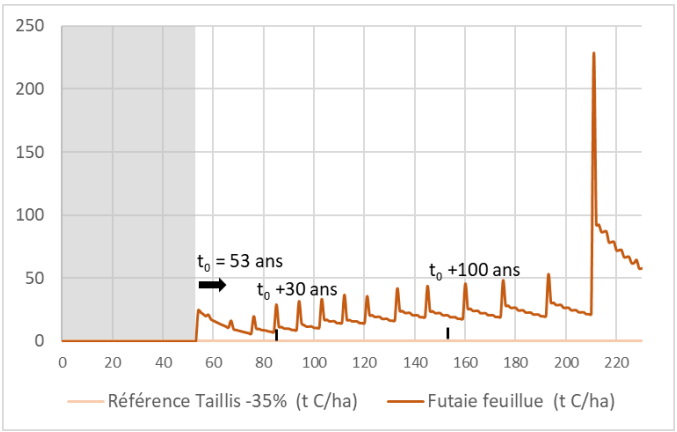
En régime permanent, le stock moyen du scénario étudié est de 174 tC/ha pour une moyenne de 80 tC/ha pour le scénario de référence.

Les variations de stock en forêt du scénario projet s'expliquent par les éclaircies pratiquées. Le stock en forêt est diminué fortement lors de la coupe finale.

Les variations de stock dans les produits du scénario projet s'expliquent par les stocks produits issus de la récolte des éclaircies. Le stock produit induit par la coupe finale est plus important.

Le stock moyen dans les produits est important (29 tC/ha à l'horizon de temps infini) mais pas autant qu'attendu du fait de l'utilisation prépondérante du bois récolté en énergie.

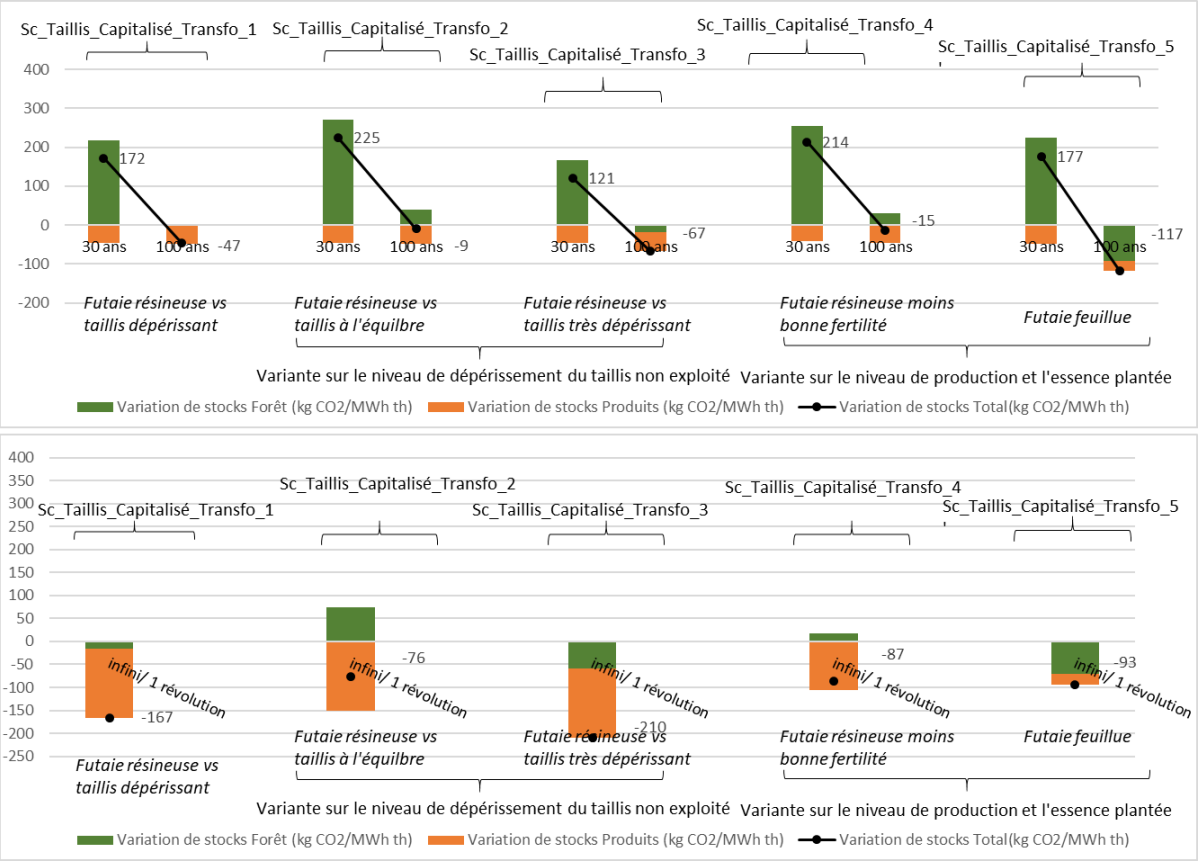
Figure 79 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5



3.3.2. Résultats

La figure suivante présente les résultats de l'indicateur de conversion ILCD pour les 5 variantes et pour les deux horizons de temps. La deuxième figure présente les résultats de l'indicateur ILCD divisant les différences de stocks en régime permanent par la production de bois sur une révolution.

Figure 80: Résultats de l'indicateur ILCD pour les scénarios de transformation des taillis



La barre verte représente la variation de stock en forêt entre les deux scénarios à l'horizon 30 ans, 100 ans (1er graphe) et en régime permanent à l'infini (2ème graphe) divisé par le différentiel de récolte de bois énergie à l'horizon 30 ans, 100 ans (1er graphe) et sur une révolution à laquelle on ajoute la récolte du peuplement initial (2ème graphe). La barre marron représente le ratio équivalent mais pour la variation de stock dans les produits. Le point noir correspond au total des deux ratios.

3.3.3. Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats doit se faire en tenant compte des limites de l'étude relatives à la méthode et aux données disponibles (voir section 8).

Plus le taillis est dépérissant, plus la transformation est intéressante du point de vue du bilan de gaz à effet de serre calculé selon la méthode ILCD (la barre verte représentant la variation de stock en forêt diminue entre Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1 et Sci_Taillis_Capitalisé_Transfo_3 qui correspond à un taillis dépérissant faisant baisser le point noir représentant le stock total). La transformation présente un bilan d'autant plus positif que la productivité de l'essence plantée est élevée (Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4).

Plus l'essence plantée est utilisée pour du bois matériau (avec une durée de vie longue), plus il y aura de stocks dans les produits et plus la transformation sera intéressante.

Le bilan s'améliore fortement avec le temps avec des bénéfices notables à 100 ans associés à la séquestration progressive du carbone en forêt via les essences plantées et la séquestration carbone dans les produits bois qui en découle.

Entre la plantation de feuillus et la plantation de résineux, on constate un meilleur impact de la transformation en feuillus, liés à des stocks moyens plus importants que les résineux sur des révolutions plus longues (barre verte correspondant à la variation de stock en forêt pour Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5 à 100 ans par rapport à Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1). À l'inverse, on constate une séquestration carbone plus importante dans les produits avec les résineux, ceci notamment grâce à une productivité élevée et des débouchés pour des matériaux à longue durée de vie bien développés (barre marron correspondant à la variation de stock dans les produits pour le scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1 par rapport à Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5). On notera toutefois que les débouchés produits feuillu/résineux pris en compte à 30 ou 100 ans sont les débouchés actuels, et que des améliorations technologiques pour développer des produits à longue durée de vie notamment pour les feuillus pourront avoir lieu dans le futur. Ces améliorations pourront donc venir renforcer le stockage du carbone dans les produits pour les feuillus.

Le carbone du sol n'est pas intégré dans ces analyses. C'est une limite importante sur cette famille de scénarios car la mise en place des plantations s'accompagne d'une coupe rase avec travail du sol, une pratique qui impacte le carbone du sol à court terme.

3.3.4. Tableau de résultats

Les résultats chiffrés sont présentés dans le tableau suivant en kg CO_2/m^3 et kg CO_2/MWh_{th} :

Tableau 107 : Résultats pour la transformation des taillis

		Variation de stocks ($kg\ CO_2/MWh_{th}$)			Variation de stocks ($kg\ CO_2/m^3$)		
Nom scénario	Horizon de temps pour le calcul du stock moyen	Forêt	Produits	Total	Forêt	Produits	Total
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1	30 ans	217	-45,4	172	425	-88,9	337
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1	100 ans	1,45	-48,5	-47,1	2,42	-80,9	-78,5
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1	Régime permanent/ 1 révolution	-16,2	- 150	- 167	-29,5	- 273	- 303
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2	30 ans	271	-45,4	225	531	-88,9	442
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2	100 ans	39,4	-48,5	-9,16	65,6	-80,9	-15,3
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2	Régime permanent/ 1 révolution	74,8	- 150	-75,6	136	- 273	- 137
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3	30 ans	167	-45,4	121	327	-88,9	238
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3	100 ans	-18,4	-48,5	-66,9	-30,7	-80,9	- 112
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3	Régime permanent/ 1 révolution	-59,8	- 150	- 210	-27,5	-69,2	-96,7
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4	30 ans	256	-42,3	214	504	-83,4	421
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4	100 ans	30,9	-45,5	-14,7	52,6	-77,5	-24,9
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4	Régime permanent/ 1 révolution	18,4	- 105	-86,9	12,9	-73,7	-60,8
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5	30 ans	225	-48,4	177	741	- 104	637
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5	100 ans	-91,3	-25,9	- 117	-90,4	-45,5	- 136
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5	Régime permanent/ 1 révolution	-71,5	-21,8	-93,3	- 123	-37,4	- 161

L'ensemble des résultats est présenté en annexe 15 du rapport.

4. Présentation des résultats relatifs aux menus bois, houppiers et souches

Les scénarios modélisent une récolte des menus bois, houppier/bois tige de faible diamètre et des souches dans le cas d'une futaie résineuse, et une récolte des menus bois uniquement dans le cas d'une futaie feuillue, ce pour différents taux de dégradation des menus bois et des souches.

Pour les menus bois, il est fait l'hypothèse que 100 % des menus bois sont récoltés pour que le scénario projet soit bien distinct du scénario de référence. Il est cependant recommandé en France de ne pas récolter plus de 70 % des menus bois sur des sols modérément sensibles à l'exportation minérale afin d'en limiter l'impact sur les écosystèmes. Cette préconisation varie selon le niveau de sensibilité du sol à l'exportation d'éléments minéraux, d'un maximum de 90 % de récolte des menus bois sur les sols faiblement sensibles, à une absence de prélèvement sur les sols fortement sensibles. Ceci explique le choix d'évaluer un scénario médian où 70 % des menus bois sont prélevés de la parcelle, le taux de prélèvement maximum dépendant des conditions locales (fertilité des sols, température, humidité, etc.). Les figures suivantes illustrent l'articulation des scénarios étudiés.

Figure 81 : Scénarios d'augmentation de la récolte en bois énergie en récoltant les menus bois et les houppiers

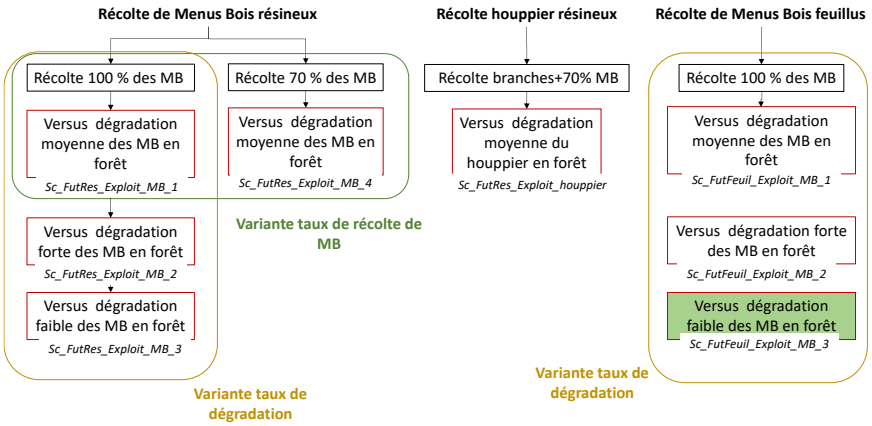
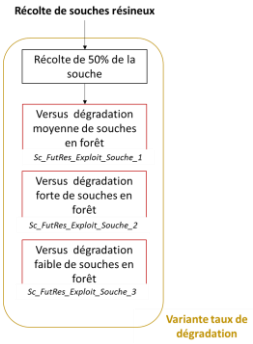


Figure 82 : Scénarios d'augmentation de la récolte en bois énergie pour les souches



4.1. Récolte de menus bois et des houppiers

Quatre scénarios sont étudiés concernant la récolte de menus bois et houppiers/bois de la tige de faible diamètre en futaie résineuse :

- Sc_FutRes_Exploit_MB _1 : récolte de 100 % des menus bois par rapport à un scénario de référence où le BIBE est récolté mais où les menus bois ne sont pas ramassés et se dégradent avec un taux de dégradation moyen.
- Deux variantes sont étudiées en considérant un taux de dégradation fort, Sc_FutRes_Exploit_MB_2, et un taux de dégradation faible, Sc_FutRes_Exploit_MB_3.
- Une autre variante, Sc_FutRes_Exploit_MB_4, considère que seuls 70 % des menus bois sont ramassés, le reste étant laissé sur site.

Un scénario s'attache à l'évaluation de la récolte du houppier/bois de la tige de faible diamètre en futaie résineuse :

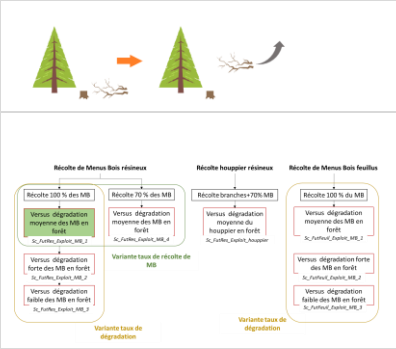
- Sc_FutRes_Exploit_Houppier : récolte du houppier et bois de la tige de faible diamètre (BIBE, 70 % des menus bois) par rapport à un scénario de référence où la totalité du BIBE et menus bois ne serait pas récolté.

Trois scénarios sont étudiés concernant la récolte de menus bois en futaie feuillue :

- Sc_FutFeuil_Exploit_MB _1 : récolte de 100 % des menus bois par rapport à un scénario de référence où le BIBE est récolté mais où les menus bois ne sont pas ramassés et se dégradent avec un taux de dégradation moyen.
- Deux variantes sont étudiées en considérant un taux de dégradation fort, Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2, et un taux de dégradation faible, Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3.

4.1.1. Présentation des scénarios

Récolte des menus bois en futaie résineuse :

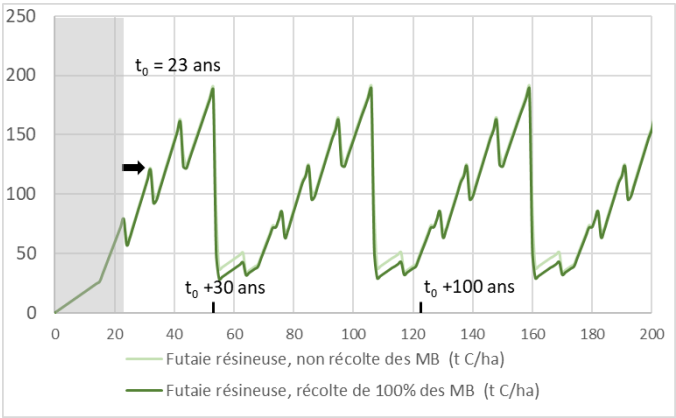


Sc_FutRes_Exploit_MB_1 : Récolte de 100 % des menus bois

- Scénario de référence :
  - Les menus bois ne sont pas récoltés et se dégradent en forêt avec une demi-vie de 5 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 100 % menus bois en éclaircie et en coupe rase d'une futaie de résineux (290 m³ de MB récoltés par ha à chaque révolution de 53 ans).
  - Utilisation des MB en énergie.

Le scénario Sc_FutRes_Exploit_MB _1 correspond à la récolte de 100 % des menus bois par rapport à un scénario de référence où le BIBE est récolté mais où les menus bois ne sont pas ramassés et se dégradent avec un taux de dégradation moyen soit une demi-vie égale à 5 ans (Dhôte et al., 2017a)(voir annexe 13). Il existe un petit différentiel de stock dans les produits associé à la demi-vie du bois énergie qui est de 0,5 année.

Figure 83 : Stocks en forêt, scénario Sc_FutRes_Exploit_MB_1



On peut observer que le stock de carbone en forêt du scénario de référence est légèrement supérieur quel que soit l'horizon de temps.

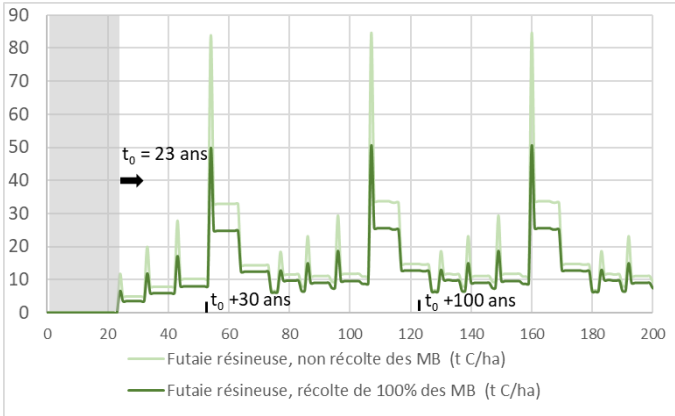
En régime permanent (stock moyen d'une révolution), le stock moyen du scénario étudié est de 96 tC/ha pour une moyenne de 103 tC/ha pour le scénario de référence.

Le différentiel de stock total en forêt est lié à la différence de stock de matière organique morte associée à la révolution comme présenté dans le graphe ci-contre. Le stock de carbone associé à la matière organique morte du scénario de référence où les menus bois sont laissés sur place est supérieur au stock calculé pour le scénario étudié où l'on ramasse 100 % des menus bois.

Note 1 : Les variations de stocks de carbone dans les sols sont étudiées postérieurement dans le rapport.

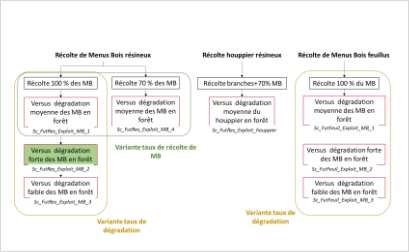
Note 2 : Les pics de matière organique morte sont liés au choix d'extrapolation entre données issues du modèle (voir section 2.2 de la présente partie).

Figure 84 : Stocks dans la matière organique morte associée à la révolution, scénario Sc_FutRes_Exploit_MB_1



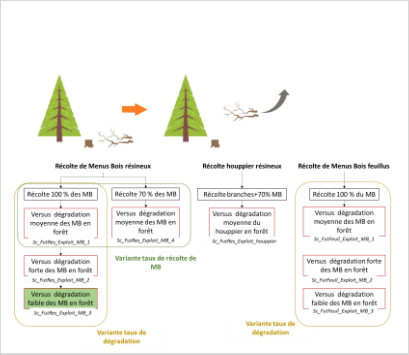
Variante sur le taux de décomposition des menus bois :

Sc_FutRes_Exploit_MB_2 : Variante en considérant un taux de dégradation fort des menus bois



- Scénario de référence :
  - Les menus bois ne sont pas récoltés et se dégradent en forêt avec une demi-vie de 3 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 100 % menus bois en éclaircie et en coupe rase d'une futaie de résineux (290 m³ de MB récoltés par ha à chaque révolution de 53 ans).
  - Utilisation des MB en énergie.

Le scénario Sc_FutRes_Exploit_MB_2 représente une variante du scénario Sc_FutRes_Exploit_MB_1 en considérant un taux de dégradation **fort** des menus bois dans le scénario de référence, soit 3 ans de demi-vie au lieu de 5 ans. Il existe un petit différentiel de stock dans les produits associé à la demi-vie du bois énergie qui est de 0,5 année.

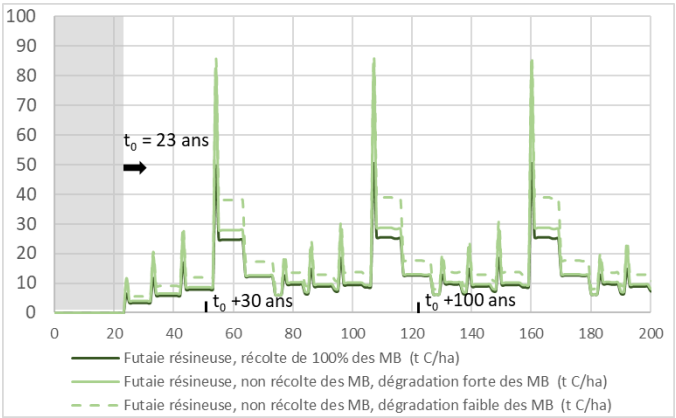


Sc_FutRes_Exploit_MB_3: Variante en considérant un taux de dégradation faible des menus bois

- Scénario de référence :
  - Les menus bois ne sont pas récoltés et se dégradent en forêt avec un demi-vie de 7 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 100 % menus bois en éclaircie et en coupe rase d'un futaie résineux (290 m³ de MB récoltés par ha à chaque révolution de 53 ans).
  - Utilisation des MB en énergie.

Le scénario Sc_FutRes_Exploit_MB_3 représente une variante du scénario Sc_FutRes_Exploit_MB_1 en considérant un taux de dégradation **faible** des menus bois dans le scénario de référence, soit 7 ans de demi-vie au lieu de 5 ans. Il existe un petit différentiel de stock dans les produits associé à la demi-vie du bois énergie qui est de 0,5 année.

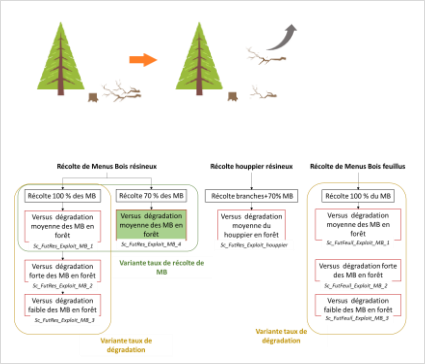
Figure 85 : Stocks dans la matière organique morte associée à la révolution, impact du taux de dégradation des MB, scénarios Sc_FutRes_Exploit_MB_2 et Sc_FutRes_Exploit_MB_3



La figure ci-contre illustre l'influence du taux de dégradation des menus bois sur les stocks de matière organique morte pour les scénarios de référence des scénarios Sc_FutRes_Exploit_MB_2 (dégradation forte des MB) et Sc_FutRes_Exploit_MB_3 (dégradation faible des MB).

Le différentiel de stock moyen entre le scénario étudié et le scénario de référence passe de 4 tC/ha à 10 tC/ha lorsque la demi-vie des menus bois en forêt passe de 3 ans à 7 ans. Ceci représente une variation de 6 % du stock de carbone en forêt total associé à la révolution.

Variante associée à la quantité de menus bois récoltés :

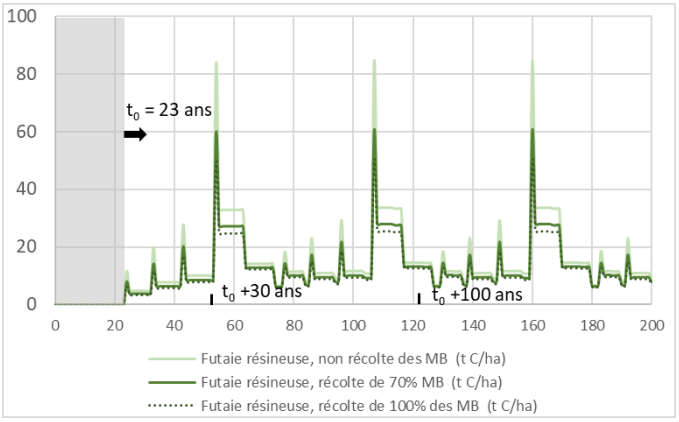


Sc_FutRes_Exploit_MB_4 : Récolte de 70 % des menus bois

- Scénario de référence :
  - Les menus bois ne sont pas récoltés et se dégradent en forêt avec une demi-vie de 5 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 70 % menus bois en éclaircie et en coupe rase d'une futaie de résineux (203 m³ de MB récoltés par ha à chaque révolution de 53 ans).
  - Utilisation des MB en énergie.

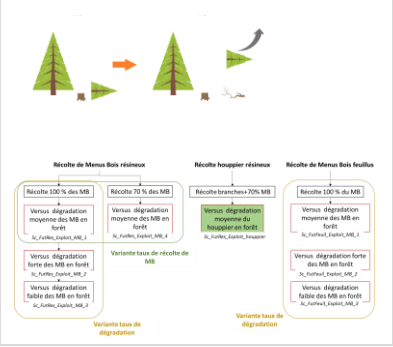
Le scénario Sc_FutRes_Exploit_MB_4 représente un scénario de récolte raisonnée des menus bois. Il s'agit d'un cas théorique étant donné que le taux de récolte des menus bois admissible pour une gestion durable des sols dépend de plusieurs facteurs : sensibilité des sols à l'exportation des nutriments et au tassement, zonages environnementaux, etc. (G. Landmann et al., 2019). Il existe un petit différentiel de stock dans les produits associé à la demi-vie du bois énergie qui est de 0,5 année.

Figure 86 : Stocks dans la matière organique morte associée à la révolution, impact du taux de récolte des MB, Sc_FutRes_Exploit_MB_1 et Sc_FutRes_Exploit_MB_4



Du fait de la moindre collecte des menus bois, le stock moyen du scénario étudié passe de 96 tC/ha pour le scénario où l'on récolte 100 % des menus bois (Sc_FutRes_Exploit_MB_1) à 98 tC/ha (Sc_FutRes_Exploit_MB_4). Cette différence provient du différentiel de stock dans la matière organique morte comme illustré ci-contre.

Récolte des houppiers/bois de la tige de faible diamètre :



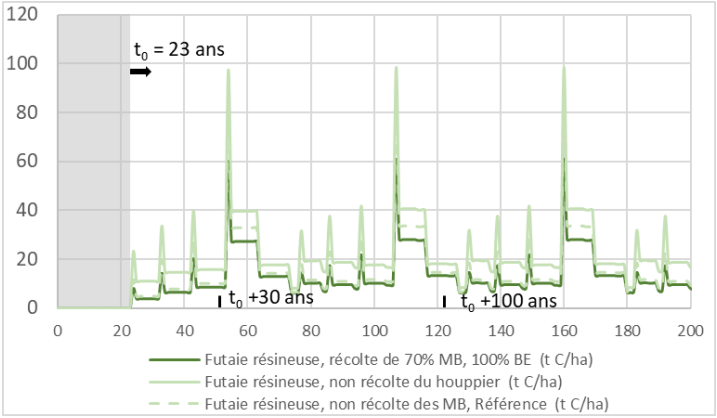
Sc_FutRes_Exploit_Houppier : Récolte du houppier par rapport à un scénario sans récolte du houppier

- Scénario de référence :
  - L'ensemble du BIBE et les menus bois (70 %)), n'est pas récolté et se dégrade en forêt avec une demi-vie de 5 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte du houppier/et bois de la tige de faible diamètre en éclaircie et en coupe rase d'une futaie de résineux (180 m³ de BIBE et 203 m³ de MB récoltés par ha à chaque révolution de 53 ans).
  - Utilisation du BI/BE et 70 % du menus bois en énergie.

Le scénario **Sc_FutRes_Exploit_Houppier** représente un scénario de récolte du BIBE[148] et menus bois pour l'énergie par rapport à un scénario où tout le BI/BE et menus bois serait laissé sur site. Il existe un petit différentiel de stock dans les produits associé à la demi-vie du bois énergie qui est de 0,5 année.

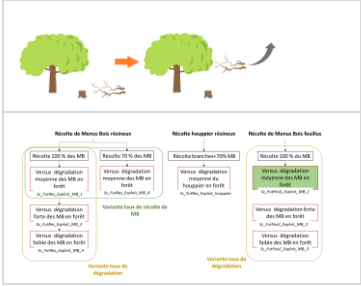
[148] Donc pour les premières éclaircies, c'est tout l'arbre qui est récolté, pas uniquement le houppier.

Figure 87 : Stocks dans la matière organique morte associée à la révolution, Sc_FutRes_Exploit_MB_1 et Sc_FutRes_Exploit_Houppier



Le stock moyen du scénario de référence augmente de 103 tC/ha (scénario Sc_FutRes_Exploit_MB1) à 112 tC/ha du fait de la non récolte du BIBE (Sc_FutRes_Exploit_Houppier). Cette différence provient du différentiel de stock dans la matière organique morte comme illustré ci-contre.

Récolte des menus bois en futaie feuillue :

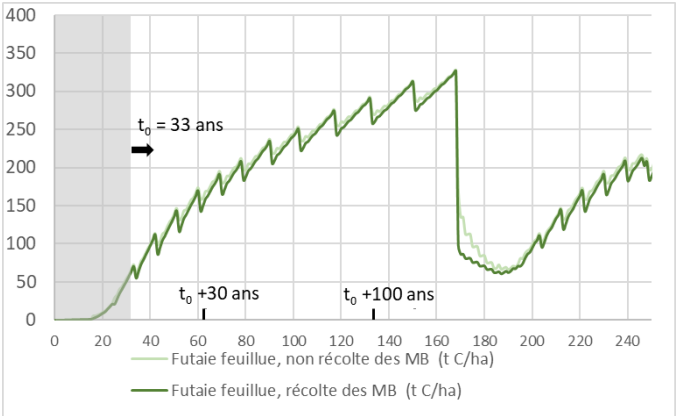


Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1 : Récolte de 100 % des menus bois

- Scénario de référence :
  - Les menus bois ne sont pas récoltés et se dégradent en forêt avec une demi-vie de 5 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 100 % menus bois en éclaircie et en coupe finale d'une futaie de feuillus (775 m³ de MB récoltés par ha à chaque révolution de 170 ans).
  - Utilisation des MB en énergie.

Le scénario Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1 correspond à la récolte de 100 % des menus bois par rapport à un scénario de référence où le BIBE est récolté mais où les menus bois ne sont pas ramassés et se dégradent avec un taux de dégradation moyen soit une demi-vie égale à 5 ans (Dhôte et al., 2017a). Il existe un petit différentiel de stock dans les produits associé à la demi-vie du bois énergie qui est de 0,5 année.

Figure 88 : Stocks en forêt, scénario Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1



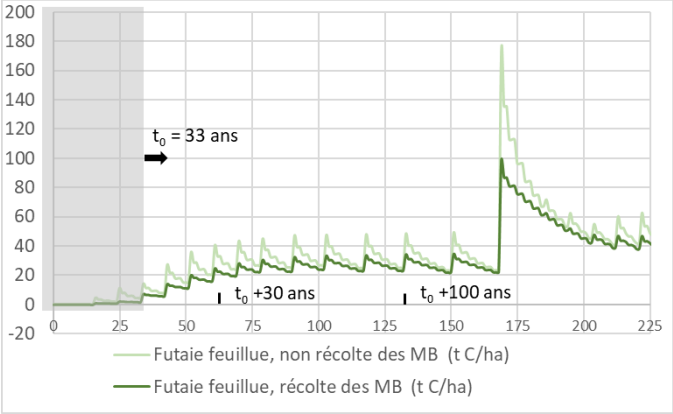
On peut observer que le stock de carbone en forêt du scénario de référence est supérieur au scénario étudié.

En régime permanent, le stock moyen du scénario étudié est de 204 tC/ha pour une moyenne de 212 tC/ha pour le scénario de référence.

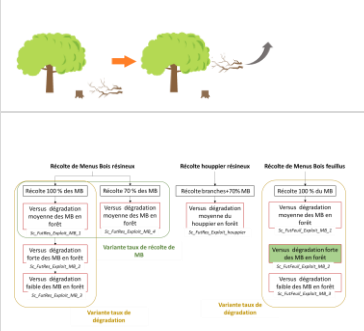
Le différentiel de stock total en forêt est lié à la différence de stock de matière organique morte associée à la révolution comme présenté dans le graphe ci-contre.

En effet, le stock de carbone associé à la matière organique morte du scénario de référence où les menus bois sont laissés sur place est supérieur au stock calculé pour le scénario étudié où l'on ramasse 100 % des menus bois.

Figure 89 : Stocks dans la matière organique morte associée à la révolution, scénario Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1



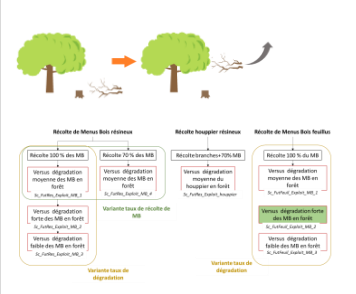
Variante taux de décomposition des menus bois :



Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2 : Variante en considérant un taux de dégradation fort des menus bois

- Scénario de référence :
  - Les menus bois ne sont pas récoltés et se dégradent en forêt avec une demi-vie de 3 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 100 % menus bois en éclaircie et en coupe finale d'une futaie de feuillus (775 m³ de MB récoltés par ha à chaque révolution de 170 ans).
  - Utilisation des MB en énergie.

Le scénario Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2 représente une variante du scénario Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1 en considérant un taux de dégradation fort des menus bois dans le scénario de référence, soit 3 ans de demi-vie au lieu de 5 ans.

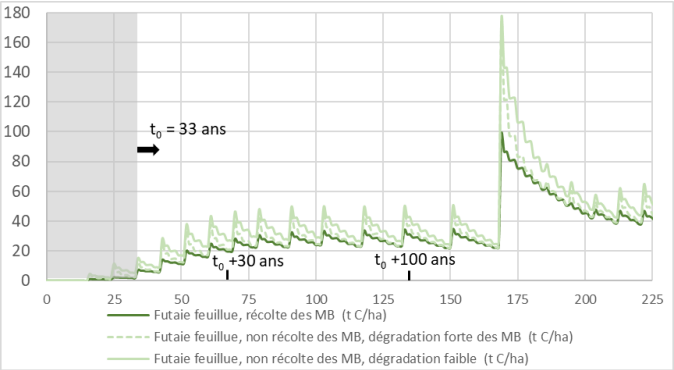


Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3: Variante en considérant un taux de dégradation faible des menus bois

- Scénario de référence :
  - Les menus bois ne sont pas récoltés et se dégradent en forêt avec un demi-vie de 7 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 100 % menus bois en éclaircie et en coupe finale d'un futaie résineux (775 m³ de MB récoltés par ha à chaque révolution de 170 ans).
  - Utilisation des MB en énergie.

Le scénario Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3 représente une variante du scénario Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1 en considérant un taux de dégradation faible des menus bois dans le scénario de référence, soit 7 ans de demi-vie au lieu de 5 ans.

Figure 90 : Stocks dans la matière organique morte associée à la révolution, impact du taux de dégradation des MB, scénarios Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2 et Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3



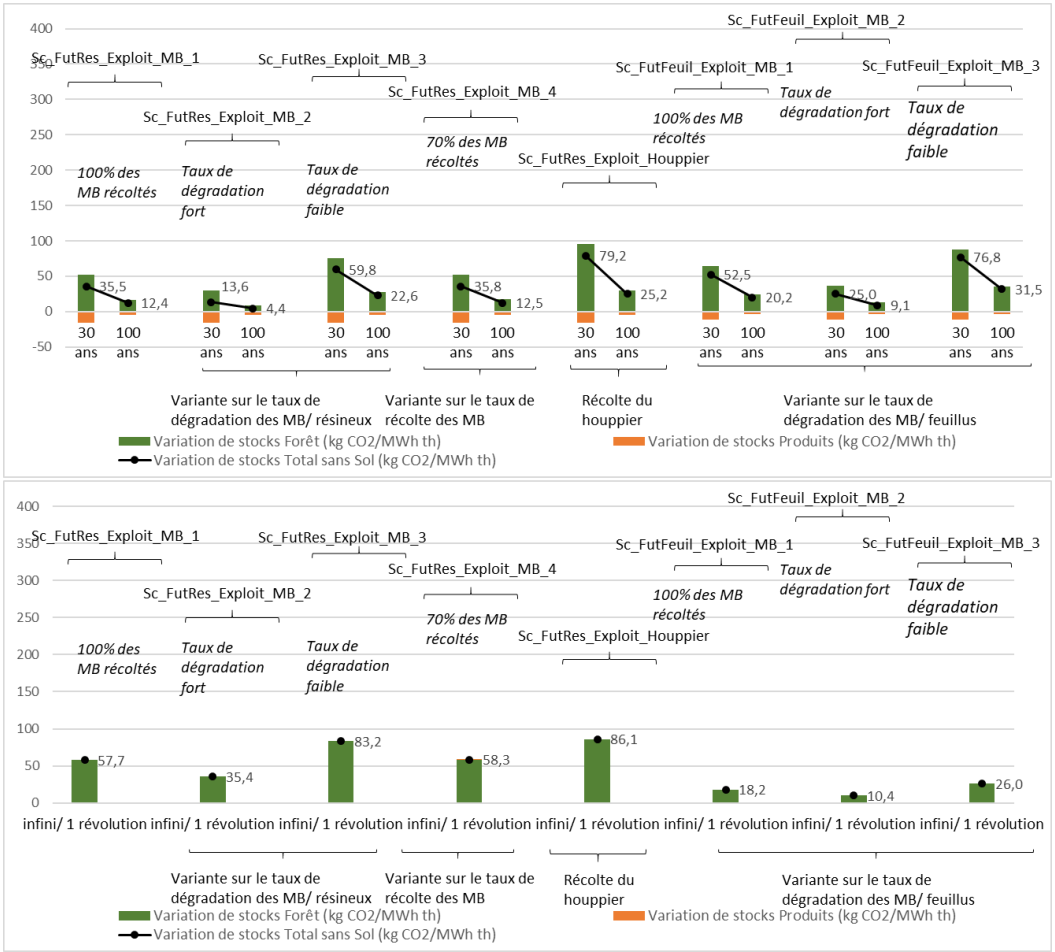
La figure ci-contre illustre l'influence du taux de dégradation des menus bois sur les stocks de matière organique morte pour les scénarios de référence de Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2 (dégradation forte des MB) et Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3 (dégradation faible des MB).

Le différentiel de stock moyen entre le scénario étudié et le scénario de référence passe de 5 tC/ha à 12 tC/ha lorsque la demi-vie des menus bois en forêt passe de 3 ans à 7 ans. Ceci représente une variation de 4 % du stock de carbone en forêt total associé à la révolution.

4.1.2. Résultats

Les figures suivantes présentent les résultats de l'indicateur de conversion ILCD pour les 8 scénarios de récolte des menus bois et du BI/BE et souches dans des futaies pour les deux horizons de temps considérés et en régime permanent.

Figure 91 : Résultats de l'indicateur ILCD pour les scénarios de récolte des MB et des houppiers



La barre verte représente la variation de stock en forêt entre les deux scénarios à l'horizon 30 ans, 100 ans (1er graphe) et en régime permanent à l'infini (stock moyen sur la durée d'une révolution) (2ème graphe) divisé par le différentiel de récolte de bois énergie à l'horizon 30 ans, 100 ans (1er graphe) et sur une révolution (2ème graphe). La barre marron représente le ratio équivalent mais pour la variation de stock dans les produits. Le point noir correspond au total des deux ratios.

L'interprétation globale des résultats est fournie en section 4.4 en intégrant la partie carbone du sol.

4.1.3. Tableau de résultats

Les résultats chiffrés sont présentés dans le tableau suivant en kg CO_2/m^3 et kg CO_2/MWh_{th} :

Tableau 108 : Résultats pour la récolte des menus bois et du houppier

		Variation de stocks (kg CO_2/MWh_{th})			Variation de stocks (kg CO_2/m^3)		
Nom scénario	Horizon de temps pour le calcul du stock moyen	Forêt	Produits	Total	Forêt	Produits	Total
Sc_FutRes_Exploit_MB_1	30 ans	51,7	-16,2	35,5	79,4	-24,9	54,5
Sc_FutRes_Exploit_MB_1	100 ans	16,9	-4,50	12,4	25,9	-6,92	19,0
Sc_FutRes_Exploit_MB_1	Régime permanent/ 1 révolution	57,7	0	57,7	88,6	0	88,6
Sc_FutRes_Exploit_MB_2	30 ans	29,8	-16,2	13,6	45,7	-24,9	20,9
Sc_FutRes_Exploit_MB_2	100 ans	8,95	-4,50	4,45	13,8	-6,92	6,83
Sc_FutRes_Exploit_MB_2	Régime permanent/ 1 révolution	35,4	0	35,4	54,4	0	54,4
Sc_FutRes_Exploit_MB_3	30 ans	75,9	-16,2	59,8	117	-24,9	91,8
Sc_FutRes_Exploit_MB_3	100 ans	27,1	-4,50	22,6	41,6	-6,92	34,7
Sc_FutRes_Exploit_MB_3	Régime permanent/ 1 révolution	83,2	0	83,2	128	0	128
Sc_FutRes_Exploit_MB_4	30 ans	52,0	-16,2	35,8	79,9	-24,9	55,1
Sc_FutRes_Exploit_MB_4	100 ans	17,0	-4,50	12,5	26,2	-6,92	19,3
Sc_FutRes_Exploit_MB_4	Régime permanent/ 1 révolution	57,7	0,600	58,3	88,6	0,922	89,5
Sc_FutRes_Exploit_Houppier	30 ans	**95,4**	-16,2	79,2	147	-24,9	122
Sc_FutRes_Exploit_Houppier	100 ans	**29,7**	-4,50	**25,2**	45,7	-6,92	38,8
Sc_FutRes_Exploit_Houppier	Régime permanent/ 1 révolution	86,1	0	86,1	132	0	132
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1	30 ans	63,9	-11,4	52,5	133	-23,7	109
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1	100 ans	24,2	-4,0	20,2	50,2	-8,27	42,0
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1	Régime permanent/ 1 révolution	18,2	0,0	18,2	37,7	0	37,7
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2	30 ans	36,5	-11,4	25,0	76	-23,7	51,9
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2	100 ans	13,1	-3,99	9,07	27,1	-8,27	18,8
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2	Régime permanent/ 1 révolution	10,4	6,93 E-09	10,4	21,6	1,44 E-08	21,6
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3	30 ans	88	-11,4	77	183	-23,7	159
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3	100 ans	35,5	-3,99	31,5	73,6	-8,27	65,4
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3	Régime permanent/ 1 révolution	26,0	6,93 E-09	26,0	53,9	1,44 E-08	53,9

L'ensemble détaillé des résultats est présenté en annexe 15 du rapport.

4.2. Récolte des souches

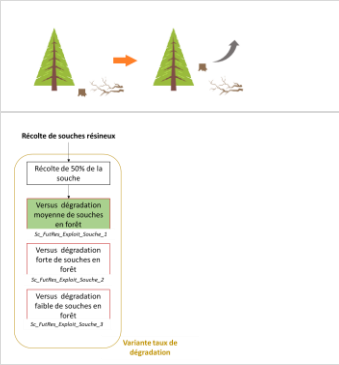
Trois scénarios sont étudiés concernant la récolte des souches en futaie résineuse :

- Sc_FutRes_Exploit_Souche _1 : récolte des souches par rapport à un scénario de référence où elles ne sont pas ramassées et se dégradent avec un taux de dégradation moyen.
- Deux variantes sont étudiées en considérant :
  - un taux de dégradation fort Sc_FutRes_Exploit_Souche_2,
  - un taux de dégradation faible, Sc_FutRes_Exploit_Souche_3.

4.2.1. Présentation des scénarios

Dans les scénarios de récolte de souches, le t_0 est placé au moment de la première coupe finale.

Récolte des souches :

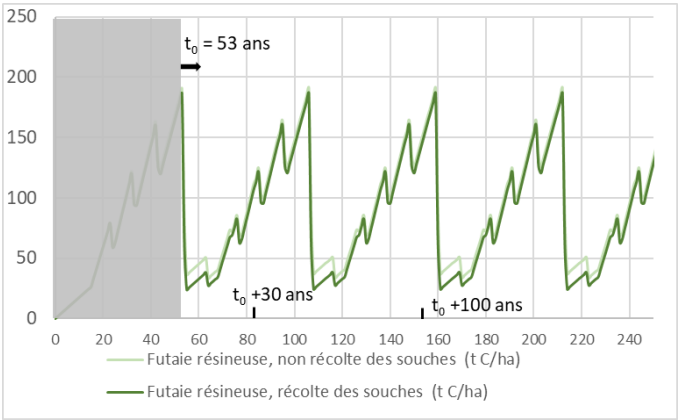


Sc_FutRes_Exploit_Souche_1 : Récolte des souches

- Scénario de référence :
  - Les souches ne sont pas récoltées et se dégradent en forêt avec une demi-vie de 10 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 50 % des souches (188 m³ récoltés par ha à chaque révolution de 53 ans).
  - Utilisation des souches en énergie.

Le scénario Sc_FutRes_Exploit_Souche_1 correspond à la récolte des souches par rapport à un scénario de référence où les souches ne sont pas récoltées. Les souches se dégradent alors en forêt avec un taux de dégradation moyen, soit une demi-vie égale à 10 ans (Dhôte et al., 2017a). L'hypothèse est faite que lorsqu'il y a dessouchage, seul 50 % de la souche est extraite. Il existe un petit différentiel de stock dans les produits associé à la demi-vie du bois énergie qui est de 0,5 année.

Figure 92 : Stocks en forêt, scénario Sc_FutRes_Exploit_Souche_1

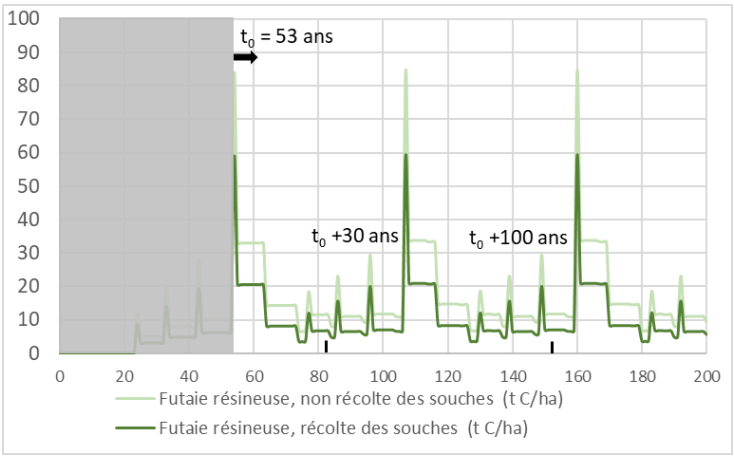


On peut observer que le stock de carbone en forêt du scénario de référence est supérieur quel que soit l'horizon de temps.

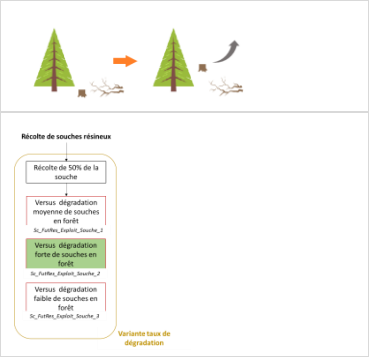
En régime permanent, le stock moyen du scénario étudié est de 94 tC/ha pour une moyenne de 103 tC/ha pour le scénario de référence. Cette différence est liée à la dégradation des souches, et donc à la quantité de matière organique morte, dans le scénario de référence.

Le stock de carbone associé à la matière organique morte du scénario de référence où les souches ne sont pas extraites est supérieur au stock calculé pour le scénario étudié où l'on extrait les souches (voir figure ci-contre).

Figure 93 : Stocks dans la matière organique morte associée à la révolution, scénario Sc_FutRes_Exploit_Souche_1



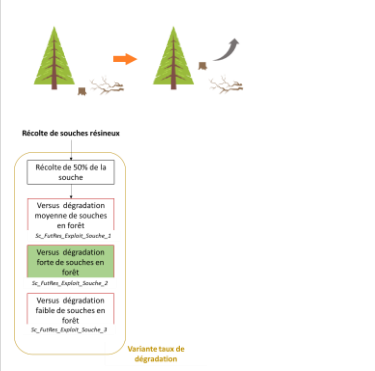
Variante sur le taux de décomposition des souches :



Sc_FutRes_Exploit_Souche_2 : Variante en considérant un taux de dégradation fort des souches

- Scénario de référence :
  - Les souches ne sont pas récoltées et se dégradent en forêt avec une demi-vie de 6 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 50 % des souches (188 m³ récoltés par ha à chaque révolution de 53 ans).
  - Utilisation des souches en énergie.

Le scénario Sc_FutRes_Exploit_Souche_2 représente une variante du scénario Sc_FutRes_Exploit_Souche_1 en considérant un taux de dégradation **fort** des souches dans le scénario de référence, soit 6 ans de demi-vie au lieu de 10 ans. Il existe un petit différentiel de stock dans les produits associé à la demi-vie du bois énergie qui est de 0,5 année.

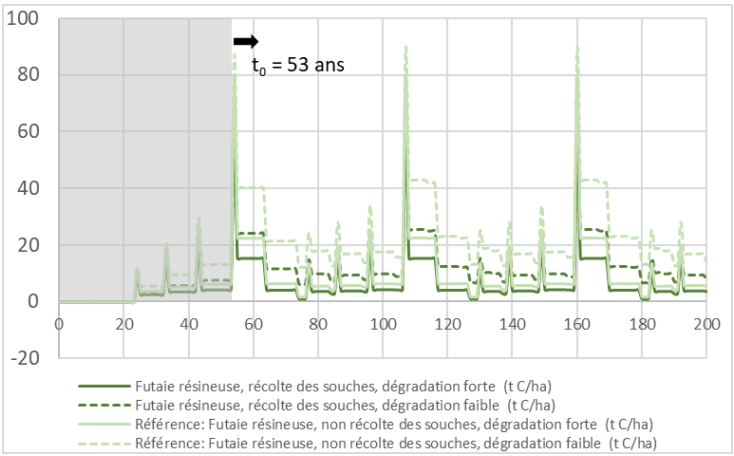


Sc_FutRes_Exploit_Souche_3: Variante en considérant un taux de dégradation faible des souches

- Scénario de référence :
  - Les souches ne sont pas récoltées et se dégradent en forêt avec un demi-vie de 14 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 50 % des souches (188 m³ récoltés par ha à chaque révolution de 53 ans).
  - Utilisation des souches en énergie.

Le scénario Sc_FutRes_Exploit_Souche_3 représente une variante du scénario Sc_FutRes_Exploit_Souche_1 en considérant un taux de dégradation **faible** des souches dans le scénario de référence, soit 14 ans de demi-vie au lieu de 10 ans.

Figure 94 : Stocks dans la matière organique morte associée à la révolution, scénarios Sc_FutRes_Exploit_Souches_2 et Sc_FutRes_Exploit_Souches_3



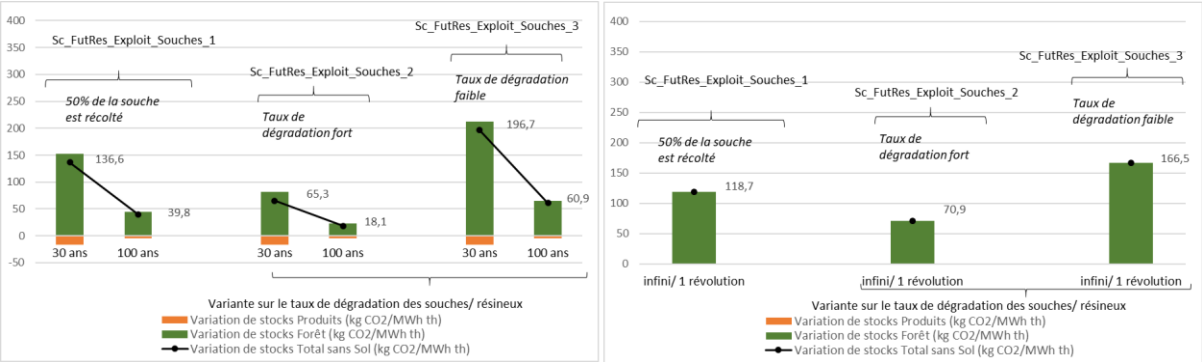
La figure ci-contre illustre l'influence du taux de dégradation des souches sur les stocks de matière organique morte pour les scénarios de référence de Sc_FutRes_Exploit_Souch_2 (dégradation forte des souches) et Sc_FutRes_Exploit_Souches_3 (dégradation faible des souches). Le taux de dégradation affecte à la fois les scénarios étudiés et les scénarios de référence étant donné que la souche est extraite à 50 %.

Le différentiel de stock moyen entre le scénario étudié et le scénario de référence passe de 5,5 tC/ha à 12,9 tC/ha lorsque la demi-vie des souches en forêt passe de 6 ans à 14 ans. Ceci représente une variation de 7 % du stock de carbone en forêt total associé à la révolution.

4.2.2. Résultats

La figure suivante présente les résultats de l'indicateur de conversion ILCD pour les 3 scénarios et pour les deux horizons du temps considérés (30 ans et 100 ans) et en régime permanent.

Figure 95 : Résultats de l'indicateur ILCD pour les scénarios de récolte des souches



La barre verte représente la variation de stock en forêt entre les deux scénarios à l'horizon 30 ans, 100 ans (1er graphe) et régime permanent à l'infini (stock moyen de la révolution) (2ème graphe) divisé par le différentiel de récolte de bois énergie à l'horizon 30 ans, 100 ans (1er graphe) et sur une révolution (2ème graphe). La barre marron représente le ratio équivalent mais pour la variation de stock dans les produits. Le point noir correspond au total des deux ratios.

L'interprétation globale des résultats est fournie en section 4.4 en intégrant la partie carbone du sol.

4.2.3. Tableau de résultats

Les résultats chiffrés sont présentés dans le tableau suivant en kg CO_2/m^3 et kg CO_2/MWh_{th} :

Tableau 109 : Résultats pour la récolte des souches

		Variation de stocks (kg CO_2/MWh_{th})			Variation de stocks (kg CO_2/m^3)		
Nom scénario	**Horizon de temps pour le calcul du stock moyen**	**Forêt**	**Produits**	**Total**	**Forêt**	**Produits**	**Total**
Sc_FutRes_Exploit_Souch_1	30 ans	152,8	-16,2	136,6	235	-24,9	210
Sc_FutRes_Exploit_Souch_1	100 ans	44,3	-4,50	39,8	68,0	-6,92	61,1
Sc_FutRes_Exploit_Souch_1	Régime permanent/ 1 révolution	119	0	119	182	0	182
Sc_FutRes_Exploit_Souch_2	30 ans	81,4	-16,2	65,3	125,1	-24,9	100,2
Sc_FutRes_Exploit_Souch_2	100 ans	22,6	-4,50	18,1	34,8	-6,92	27,9
Sc_FutRes_Exploit_Souch_2	Régime permanent/ 1 révolution	70,9	0	70,9	109	0	109
Sc_FutRes_Exploit_Souch_3	30 ans	213	-16,2	197	327	-24,9	302
Sc_FutRes_Exploit_Souch_3	100 ans	65,4	-4,50	60,9	100,5	-6,92	93,5
Sc_FutRes_Exploit_Souch_3	Régime permanent/ 1 révolution	166	0	166	256	0	256

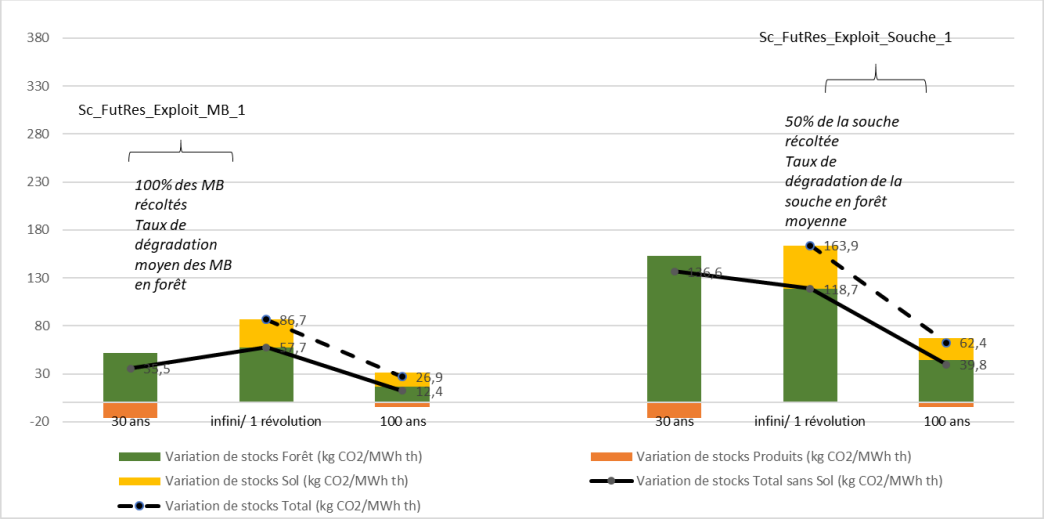
L'ensemble des résultats est présenté en annexe 15 du rapport.

4.3. Estimation de l'impact des scénarios de récolte de menus bois et des souches sur le carbone du sol

La récolte de l'ensemble des menus bois et des souches peut avoir un impact sur le carbone du sol (Achat, Fortin, Landmann, Ringeval, & Augusto, 2015). L'étude Achat et al. (2018), réalisée dans le cadre du projet EVAFORA, montre une perte de 5 % du carbone du sol entre 2006 et 2100 que ce soit pour le pin maritime ou le douglas en itinéraire I1 par rapport à l'itinéraire standard. L'itinéraire I1 se définit pour ces deux essences comme une récolte de la grume et des branches sans feuilles aux éclaircies, et une récolte de la grume, des branches et du pivot racinaire lors de la coupe rase. Pour la variante I2 où les feuilles sont récoltées, la perte est légèrement supérieure, mais du même ordre de grandeur (5 %).

La figure suivante présente les résultats de la conversion ILCD pour les horizons 100 ans et infini intégrant cette estimation des impacts sur le sol.

Figure 96 : Résultats de l'indicateur ILCD pour les scénarios de récolte des MB (100 %) et des souches avec une estimation de l'impact sur le carbone du sol



La barre verte représente la variation de stock en forêt entre les deux scénarios en régime permanent à l'infini et 100 ans divisé par le différentiel de récolte de bois énergie à 1 révolution et 100 ans. La barre marron représente le ratio équivalent mais pour la variation de stock dans les produits et la barre jaune représente une estimation du ratio équivalent pour la variation de stock dans le sol. Le point noir correspond au total des deux ratios en forêt et dans les produits. Le point gris correspond au total des trois ratios en forêt, dans les produits et dans le sol.

4.4. Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats doit se faire en tenant compte des limites de l'étude relatives à la méthode et aux données disponibles (voir section 8).

Les résultats des scénarios de récolte des menus bois sont très dépendants du taux de dégradation des menus bois considéré : une augmentation ou une diminution du taux de dégradation a un impact de plus ou moins 60 % sur les résultats à 100 ans (futaie résineuse et futaie feuillue). Une estimation des impacts associés à ces pratiques sur le carbone du sol est donnée dans la section 4.3 de la présente partie.

Le fait de ne récolter que 70 % des menus bois au lieu de 100 % n'a pas d'impact sur les résultats de la partie biomasse, car le rapport entre le delta de stock avec le scénario de référence et le volume de bois récolté reste le même. Cependant cela a un impact important sur la partie carbone du sol (voir paragraphe suivant). Enfin, sans considérer l'impact sur le carbone du sol, l'impact de la récolte de l'ensemble du houppier, BIBE et menus bois, par rapport à sa non-récolte, est plus impactant que le scénario où la récolte additionnelle ne porte que sur les menus bois.

Hors carbone du sol, on peut constater que les scénarios qui considèrent l'extraction des souches sont plus impactants que ceux qui intègrent une récolte des menus bois. Ceci est lié principalement au fait que le taux de dégradation des souches est inférieur au taux de dégradation des menus bois. Les résultats sont très dépendants du taux de dégradation considéré des souches en forêt dans le scénario : une augmentation ou une diminution du taux de dégradation des souches a un impact de ± 50% sur les résultats à 100 ans.

Les résultats présentent des stocks produits faibles mais non nuls, alors que la récolte additionnelle est utilisée entièrement en énergie. Ces stocks sont liés à la demi-vie du bois énergie qui est de 0,5 année et au mode d'extrapolation utilisé entre deux données issues des modèles ainsi qu'au calcul des stocks moyens année par année utilisé dans Excel (voir section 2.2 de la présente partie).

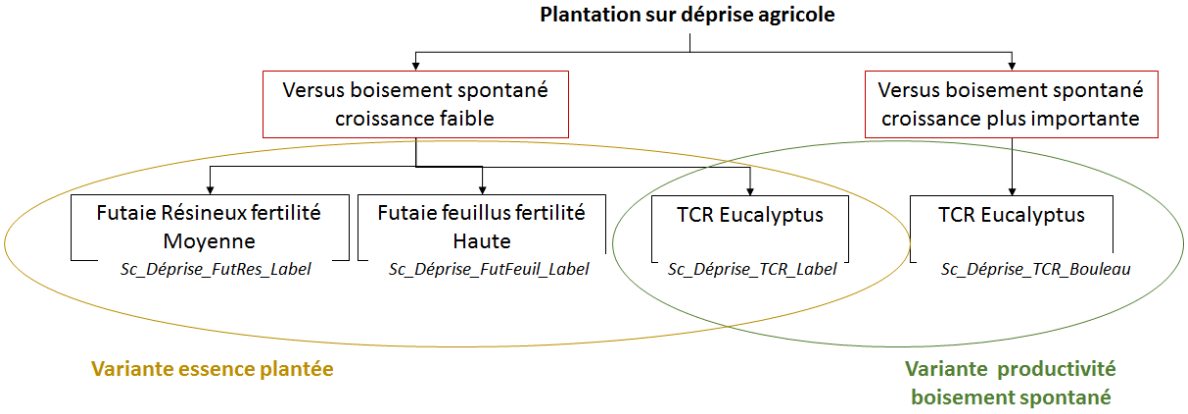
Des estimations des émissions associées à la prise en compte du carbone du sol ont été réalisées pour les scénarios de récolte des souches et de la totalité des menus bois. Selon les estimations réalisées, l'impact associé à la variation de la quantité de carbone du sol pour ces scénarios représente la moitié de celui associé à la variation de stock de la biomasse vivante et de la matière organique morte. Ainsi, si l'on tient compte du carbone du sol, la récolte de 70 % des menus bois au lieu de 100 % est beaucoup moins impactante (-33 %) que la récolte de la totalité de ceux-ci (si l'on considère que ne récolter que 70 % des menus bois n'affecte pas le carbone du sol).

La différence de résultats entre scénarios de récolte de menus bois en futaie feuillue et en futaie résineuse n'est pas significative. Elle est notamment liée à la chronologie utilisée dans la méthodologie employée.

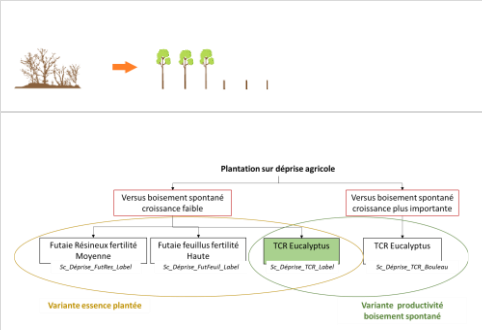
5. Présentation des résultats relatifs aux déprises agricoles

Les scénarios sont basés sur le boisement de terres en déprise agricole en considérant différentes plantations : des taillis à courte rotation d'eucalyptus, une futaie résineuse ou une futaie feuillue. Pour le TCR d'eucalyptus, deux scénarios de référence sont considérés : des hypothèses de croissance des boisements spontanés utilisées dans la méthodologie du Label bas-carbone établis à dire d'experts, à savoir une croissance de 1 m³ par an et par ha, et un scénario correspondant à un taillis de bouleau avec une croissance de 3 m³ par an et par ha jusqu'à 50 ans et des stocks stables ensuite. La figure suivante illustre l'articulation des scénarios étudiés.

Figure 97 : Scénarios de reboisement des terres en déprise agricole



5.1. Présentation des scénarios

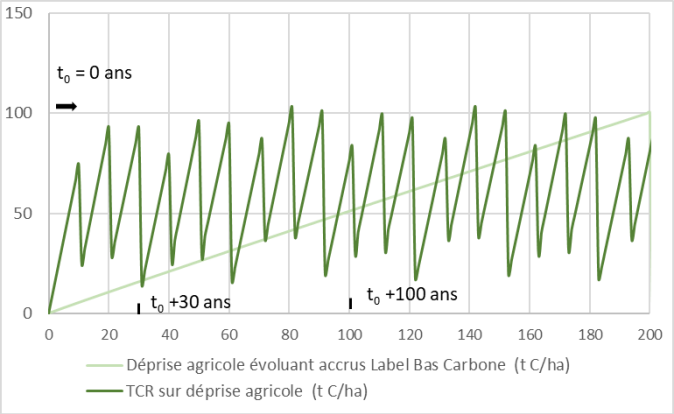


Sc_Deprise_TCR_Label : Récolte arbre entier

- Scénario de référence :
  - Scénario de référence boisement spontané du Label bas-carbone (accroissement de 1 m³ par an et par ha).
- Scénario projet :
  - TCR Fertilité haute - production moyenne (bois for tige) : 22 m³/ha/an.
  - Révolution : 30 ans.
  - Récolte arbre entier : 100 % en énergie.

Le scénario Sc_Déprise_TCR_Label correspond à la récolte de taillis courte rotation d'eucalyptus par rapport à un scénario de référence qui se base sur le scénario de référence du Label bas-carbone (CNPF & Ministère de la transition écologique et solidaire, 2019), soit un embroussaillement par des accrus. Il faut noter que dans le scénario du label, l'évaluation s'arrête à 30 ans. Il est fait l'hypothèse ici que les accrus continuent de se développer avec le même accroissement après 30 ans. Un plafonnement de l'accroissement net n'a pas été considéré dû au faible rythme de croissance considéré (sur 200 ans les stocks du boisement spontané sont proches du stock maximum du TCR). Par ailleurs, le calcul du stock moyen à l'infini pour ce même scénario de référence correspond en réalité à un calcul réalisé sur 200 ans.

Figure 98 : Stocks en forêt, scénario Sc_Déprise_TCR_Label

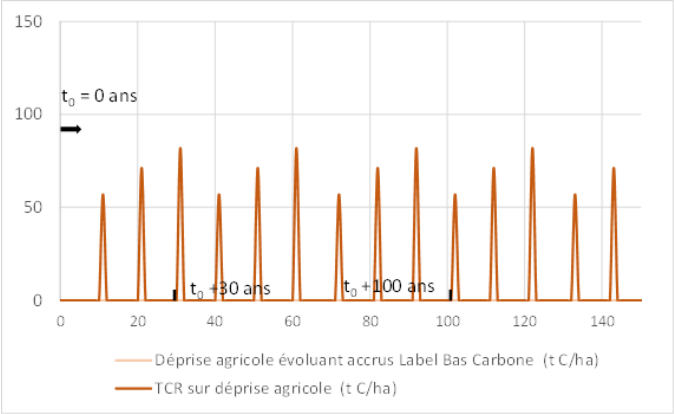


On peut observer que le stock de carbone en forêt du scénario étudié est supérieur au scénario de référence.

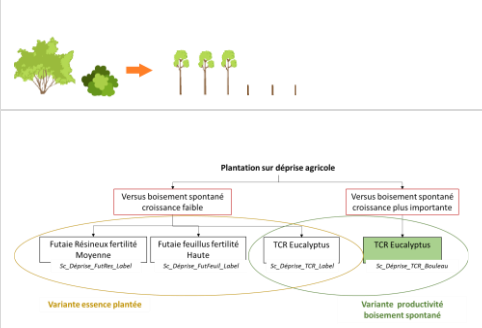
En régime permanent à l'infini (le stock moyen d'une révolution pour le scénario projet et le stock moyen sur 200 ans pour le scénario de référence), le stock moyen du scénario étudié est de 59 tC/ha pour une moyenne de 50 tC/ha pour le scénario de référence.

Le stock moyen dans les produits est très faible du fait de l'utilisation exclusive du bois en énergie (il existe néanmoins un stock du fait de la demi-vie du bois énergie qui est inférieure à un an mais génère un stock éphémère).

Figure 99 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Déprise_TCR_Label



Variante scénario boisement spontané plus productif :

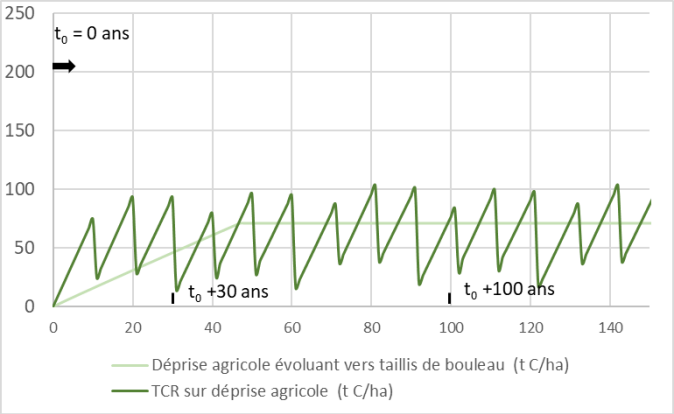


Sc_Deprise_TCR_Bouleau: Récolte arbre entier

- Scénario de référence :
  - Taillis de bouleau (accroissement de 3 m³ par an et par ha, atteinte une stabilité des stocks à 72 tC/ha de biomasse aérienne et souterraine).
- Scénario projet :
  - TCR Fertilité haute - production moyenne (bois for tige) : 22 m³/ha/an.
  - Révolution : 30 ans.
  - Récolte arbre entier : 100 % en énergie.

Le scénario Sc_Déprise_TCR_Bouleau correspond à un taillis courte rotation d'eucalyptus par rapport à un taillis de bouleau qui constitue le scénario de référence pour le boisement spontané. Il faut noter qu'un plafonnement de l'accroissement net a été considéré à 50 ans. Le stock dans les produits du scénario étudié est le même que celui du scénario Sc_Déprise_TCR_Label.

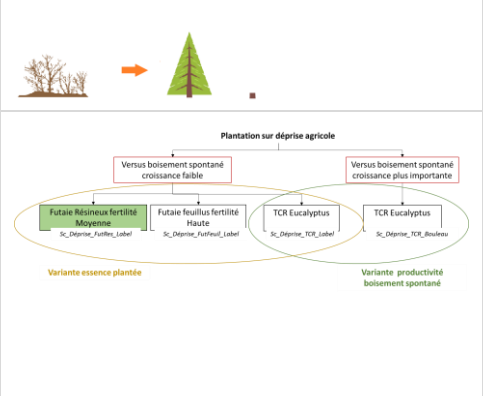
Figure 100 : Stocks en forêt, scénario Sc_Déprise_TCR_Bouleau



On peut observer que le stock de carbone en forêt du scénario étudié est supérieur au scénario de référence jusqu'à l'horizon 100 ans.

En régime permanent (qui est en réalité calculé sur 200 ans pour le scénario de référence), le stock moyen du scénario étudié est de 59 tC/ha pour une moyenne de 63 tC/ha pour le scénario de référence.

Variantes essences plantées :



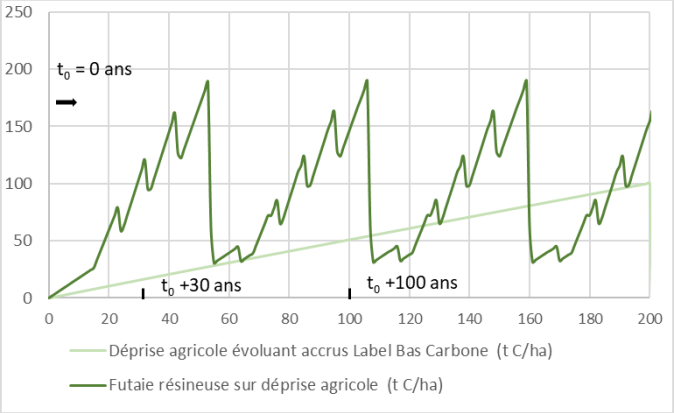
Sc_Deprise_FutRes_Label : boisement par une futaie résineuse

- Scénario de référence :
  - Scénario de référence du Label bas-carbone (accroissement de 1 m³ par an et par ha).
- Scénario projet :
  - Futaie résineuse.
  - Fertilité moyenne à haute – Production moyenne (bois fort tige) : 19 m³/ha/an.
  - Révolution : 53 ans.

Utilisation : 39 % en bois énergie, 24 % en construction, 17 % en emballage, 9 % en papier, 5 % en ameublement et 6 % en utilisation interne à la filière (énergie pour le séchage).

Le scénario Sc_Déprise_FutRes_Label correspond à une futaie résineuse par rapport à un scénario de référence qui se base sur le scénario de référence du Label bas-carbone (voir scénario Sc_Déprise_TCR_Label).

Figure 101 : Stocks en forêt, scénario Sc_Déprise_FutRes_Label

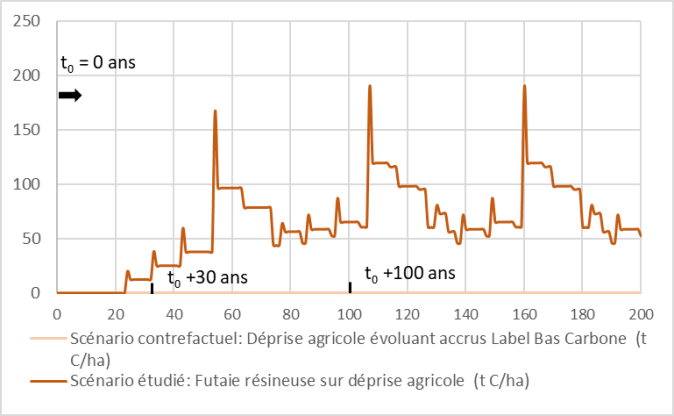


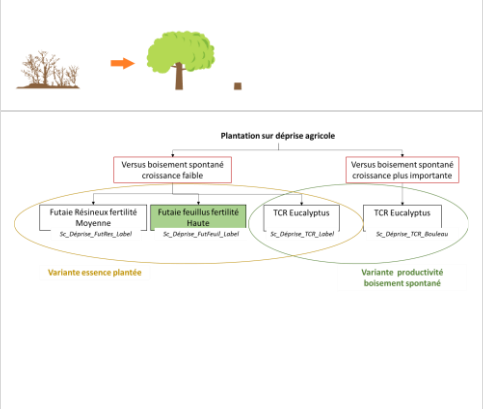
On peut observer que le stock de carbone en forêt du scénario étudié est supérieur au scénario de référence.

En régime permanenti, le stock moyen du scénario étudié est de 98 tC/ha pour une moyenne de 50 tC/ha pour le scénario de référence.

Le stock moyen dans les produits est important (69 tC/ha sur 200 ans) du fait de l'utilisation importante du bois récolté en construction.

Figure 102 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Déprise_FutRes_Label



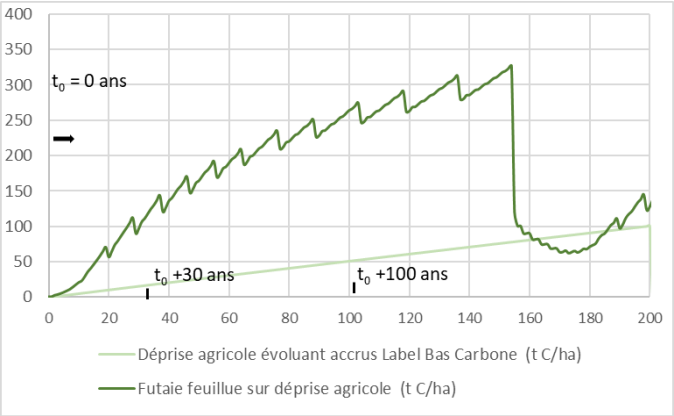


Sc_Deprise_FutFeuil_Label : boisement par une futaie feuillue

- Scénario de référence :
  - Scénario de référence du Label bas-carbone (accroissement de 1 m³ par an et par ha).
- Scénario projet :
  - Futaie feuillue.
  - Fertilité haute – Production moyenne (bois fort tige) : 9 m³/ha/an.
  - Révolution : 170 ans.
  - Utilisation : 62 % en énergie, 11 % en construction, 10 % en ameublement, 8 % en papier, 4 % en emballage et 4 % en énergie interne à la filière (séchage). 70 % des menus bois sont récoltés pour l'énergie.

Le scénario Sc_Déprise_FutFeuil_Label correspond à une futaie feuillue par rapport à un scénario de référence qui se base sur le scénario de référence du Label bas-carbone (voir scénario Sc_Déprise_TCR_Label).

Figure 103 : Stocks en forêt, scénario Sc_Déprise_FutFeuil_Label

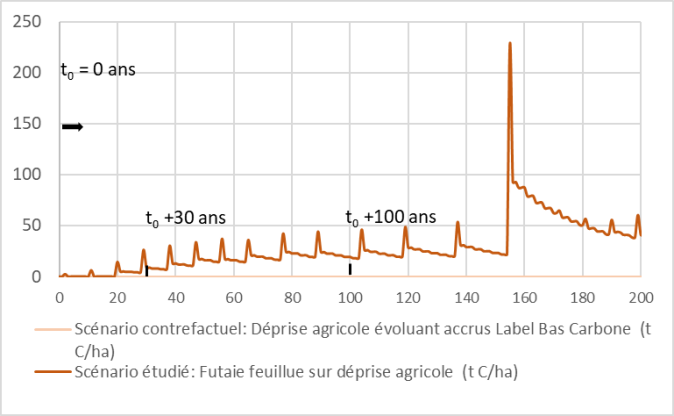


On peut observer que le stock de carbone en forêt du scénario étudié est très supérieur au scénario de référence quel que soit l'horizon de temps.

En régime permanent, le stock moyen du scénario étudié est de 206 tC/ha pour une moyenne de 50 tC/ha pour le scénario de référence.

Le stock moyen dans les produits du scénario étudié est moyennement important (35 tC/ha à l'horizon de temps infini) du fait d'une forte utilisation du bois en énergie.

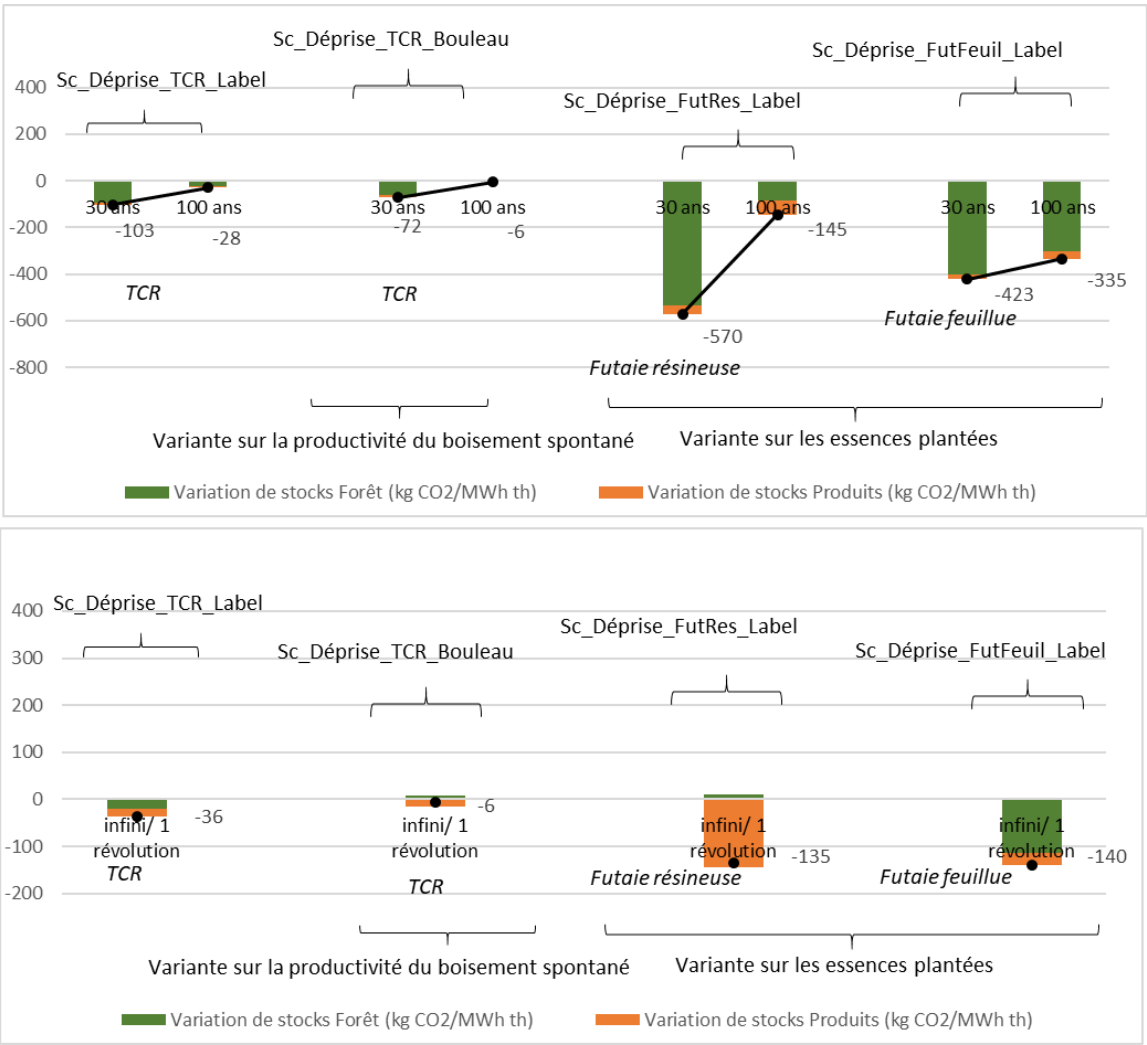
Figure 104 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Déprise_FutFeuil_Label



5.2. Résultats

La figure suivante présente les résultats de l'indicateur de conversion ILCD pour les 4 scénarios et pour les trois horizons de temps.

Figure 105 : Résultats de l'indicateur ILCD pour les scénarios de boisement de terres en déprise agricole



La barre verte représente la variation de stock en forêt entre les deux scénarios à l'horizon 30 ans, 100 ans (1er graphe) et en régime permanent à l'infini (2ème graphe) divisé par le différentiel de récolte de bois énergie à l'horizon 30 ans, 100 ans (1er graphe) et sur une révolution (2ème graphe). La barre marron représente le ratio équivalent mais pour la variation de stock dans les produits. Le point noir correspond au total des deux ratios.

5.3. Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats doit se faire en tenant compte des limites de l'étude relatives à la méthode et à la disponibilité des données (voir section 8).

Par rapport au scénario de référence du Label bas-carbone, l'ensemble des scénarios de boisement retenus présentent des résultats permettant de stocker plus de carbone quel que soit l'horizon (les barres vertes de la figure ci-dessus représentant la variation de stock entre le scénario étudié et le scénario de référence sont toutes au-dessous de 0). Les scénarios de boisement en futaie présentent un meilleur bilan que les taillis à courte rotation (TCR) du fait du stockage supérieur en forêt et dans les produits (les barres vertes et marrons sont plus importantes dans le cas des futaies).

5.4. Tableau de résultats

Les résultats chiffrés sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 110 : Résultats pour la récolte des plantations sur déprise agricole

		Variation de stocks ($kg\ CO_2/MWh_{th}$)			Variation de stocks ($kg\ CO_2/m^3$)		
Nom scénario	Horizon de temps pour le calcul du stock moyen	Forêt	Produits	Total	Forêt	Produits	Total
Sc_Déprise_TCR_Label	30 ans	-92,7	-10,4	- 103	- 198	-22,2	- 220
Sc_Déprise_TCR_Label	100 ans	-23,3	-4,84	-28,1	-49,6	-10,3	-59,9
Sc_Déprise_TCR_Label	Régime permanent/ 1 révolution	-20,5	-15,2	-35,8	-43,8	-32,5	-76,3
Sc_Déprise_TCR_Bouleau	30 ans	-61,3	-10,4	-71,7	- 131	-22,2	- 153
Sc_Déprise_TCR_Bouleau	100 ans	-1,63	-4,84	-6,47	-3,48	-10,3	-13,8
Sc_Déprise_TCR_Bouleau	Régime permanent/ 1 révolution	8,91	-15,2	-6,33	19,0	-32,5	-13,5
Sc_Déprise_FutRes_Label	30 ans	- 534	-36,4	- 570	- 820	-55,9	- 876
Sc_Déprise_FutRes_Label	100 ans	-83,4	-61,7	- 145	- 128	-94,8	- 223
Sc_Déprise_FutRes_Label	Régime permanent/ 1 révolution	10,2	- 145	- 135	15,6	- 222	- 207
Sc_Déprise_FutFeuil_Label	30 ans	- 401	-22,8	- 423	- 830	-47,2	- 878
Sc_Déprise_FutFeuil_Label	100 ans	- 301	-33,6	- 335	- 624	-69,7	- 694
Sc_Déprise_FutFeuil_Label	Régime permanent/ 1 révolution	- 115	-25,4	- 140	- 238	-52,7	- 291

L'ensemble des résultats est présenté en annexe 15 du rapport.

6. Présentation du bilan GES total de la production de chaleur à partir de plaquettes forestières, issues de différents scénarios sylvicoles intégrant une récolte accrue du bois en forêt

L'objectif de l'analyse réalisée dans ce paragraphe est d'évaluer la part potentielle de l'impact des GES d'origine biogénique par rapport aux émissions GES d'origine fossile lors de la production de chaleur à partir de plaquettes forestières, issues de différents scénarios sylvicoles intégrant une récolte accrue du bois en forêt.

6.1. Résumé du bilan GES biogénique

6.1.1. Introduction

Dans ce paragraphe sont résumés les résultats de la quantification du bilan GES d'origine biogénique de l'énergie produite à partir de plaquettes forestières issue de différents scénarios sylvicoles produisant une récolte accrue de bois pour les trois cas-types étudiés dans les sections 3 à 5 ci-dessus.

6.1.2. Résumé des scénarios étudiés

Cas-type 1 : « Mise en exploitation d'un taillis non exploité » (cf. section 3 ci-dessus)

Cette mise en exploitation est comparée à un scénario de référence sans mise en gestion du taillis. Trois scénarios de mise en exploitation ont été étudiés et sont détaillés ci-dessous.

- Exploitation en taillis :
  - Mise en exploitation d'un taillis de châtaignier en croissance, principalement pour l'énergie.
  - Dans le scénario projet on modélise une exploitation maintenant un système de taillis (récolte du bois fort et 70 % de menus bois).
  - Variabilité liée à deux analyses de sensibilité : (1) sur le niveau de productivité du taillis variant de 10 m³/ha/an avec une durée de révolution de 20 ans, et 5,5 m³/ha/an avec une durée de rotation de 35 ans ; (2) sur l'utilisation du bois récolté variant de 70 % énergie/30 % matériau ou 30 % énergie/70 % matériau.
  - Le scénario de référence correspond à un taillis sans exploitation qui continue sa croissance à un rythme plus faible que le scénario projet (entre 3,14 m³/ha/an et 1,6 m³/ha/an selon fertilité) puis subit un dépérissement de 35 % du stock.
- Amélioration vers la futaie :
  - Conversion d'un taillis « bien venants » de châtaignier en futaie par sélection des arbres d'avenir.
  - Dans le scénario projet on modélise un accroissement de 9 m³/ha/an et une durée de révolution de 50 ans (récolte du bois fort et 70 % de menus bois).
  - Le scénario de référence correspond à un taillis sans éclaircie qui continue sa croissance à une rythme plus faible (3,14 m³/ha/an) puis subit un dépérissement de 35 % du stock
- Transformation par plantation :
  - Transformation d'un taillis de châtaignier capitalisé par plantation d'une futaie résineuse.
  - Variabilité liée à deux analyses de sensibilité : (1) sur la productivité de l'essence plantée, variant de 19 à 13 m³/ha/an pour du douglas et 9 m³/ha/an pour du chêne ; (2) sur le niveau de dépérissement du taillis non exploité dans le scénario de référence, variant d'une stabilité des stocks (accroissement égal à mortalité) à 50 % de perte de stock.

Pour cette famille de scénarios, les éventuelles variations de carbone dans les sols ne sont pas considérées. La revue de la bibliographie ne nous a pas permis de quantifier les éventuels impacts d'une récolte partielle (70 %) des menus bois. Le scénario de transformation du taillis par plantation pourrait avoir une incidence négative à court terme liée à la coupe totale associée à un travail du sol. La bibliographie ne nous a pas permis cependant de quantifier les éventuels impacts à court terme.

Cas-type 2 : « Récolte accrue de produits annexes à la récolte de bois d'œuvre » (cf. section 4 ci-dessus)

Les trois scénarios de récolte sont détaillés ci-dessous. Ces scénarios sont comparés à des scénarios de référence où les menus bois, houppiers, ou souches ne sont pas récoltés et se décomposent en forêt.

- Menus bois :
  - Récolte des menus bois (inférieurs à 7 cm) sur des futailles de douglas ou du chêne.
  - Variabilité liée à l'analyse de sensibilité concernant le taux de dégradation du menu bois laissés en forêt dans le scénario de référence (durée de demi-vie variant entre 3 et 7 ans) et à l'essence (résineux/feuillus).
- Houppier/tige de faible diamètre :
  - Récolte d'houppier et tige de faible diamètre dans une plantation de douglas lors des éclaircies et coupes finales, c'est-à-dire de l'ensemble du compartiment BI/BE et 70 % des menus bois.
  - Le scénario de référence correspond à la dégradation des houppiers/tiges de faible diamètre en forêt avec durée de demi-vie de 5 ans.
- Souches :
  - Récolte de souches dans une plantation de douglas.
  - Variabilité liée à l'analyse de sensibilité concernant le taux de dégradation des souches en forêt dans le scénario de référence (avec demi-vie variante de 6 à 14 ans).

Pour les scénarios menus bois et souches, une perte de 5 %[149] du carbone du sol ont été prise en compte en analyse de sensibilité sur la modélisation à 100 ans (non prise en compte dans les résultats à 30 ans). La revue de la bibliographie ne nous a pas permis de quantifier les éventuels impacts d'une récolte partielle (70 %) des menus bois ou ses éventuelles impacts sur le court terme.

Cas-type 3 : « Plantation sur déprise agricole » (cf. section 5 ci-dessus)

Cette mise en exploitation est comparée à un scénario de référence de boisement spontané.

- Futaie de feuillus :
  - Plantation de chêne avec accroissement moyen de 9 m³/ha/an et durée de révolution 170 ans.
  - Récolte de bois matériau et bois énergie.
  - Scénario de référence boisement spontané 1 m³/ha/an.
- Futaie de résineux :
  - Plantation de douglas avec accroissement moyen de 19 m³/ha/an et durée de révolution de 53 ans.
  - Récolte de bois matériau et bois énergie.
  - Scénario de référence boisement spontané 1 m³/ha/an.
- Mise en place d'un taillis à courte rotation (TCR) :
  - Plantation d'eucalyptus[150] avec accroissement moyen de 22 m³/ha/an et coupes tous les 10 ans.
  - Récolte exclusive pour l'énergie.
  - Variabilité liée à l'analyse de sensibilité concernant le niveau d'accroissement du scénario de référence boisement spontané, variant entre 1 m³/ha/an et 3 m³/ha/an.

Pour cette famille de scénarios, les éventuelles variations de carbone dans les sols entre le scénario de référence et le scénario projet ne sont pas considérées, car sur les deux scénarios une forêt sera développée[151].

6.1.3. Résumé des résultats du bilan GES biogénique des scénarios

Cas-type 1 – Mise en gestion d'un taillis

La figure ci-dessous présente la contribution des GES d'origine biogénique au changement climatique pour la production d'1 MWh_{th} de chaleur dans une chaufferie alimentée par des plaquettes forestières dont la biomasse est issue de différents types de gestion sylvicole :

- l'exploitation d'un taillis ;
- l'amélioration du taillis ;

[149] L'étude Achat et al. (2018), montre une perte de 5 % du carbone du sol sur 100 ans pour le douglas pour la récolte en arbre entier par rapport au standard.
[150] Essence non présente aujourd'hui en France mais qui pourrait être utilisée si le TCR se développe.
[151] Le développement d'une forêt (que ce soit par boisement spontané ou par plantation) sur une ancienne terre agricole cultivée conduit à une augmentation de carbone dans les sols. Si le développement de la forêt a lieu sur une prairie, l'augmentation de stock n'est pas attendue car les stocks de carbone des sols des prairies sont similaires à ceux des forêts.

- la récolte d'un taillis dépérissant et sa transformation.

La contribution totale est présentée sous la forme d'une gamme de valeurs :

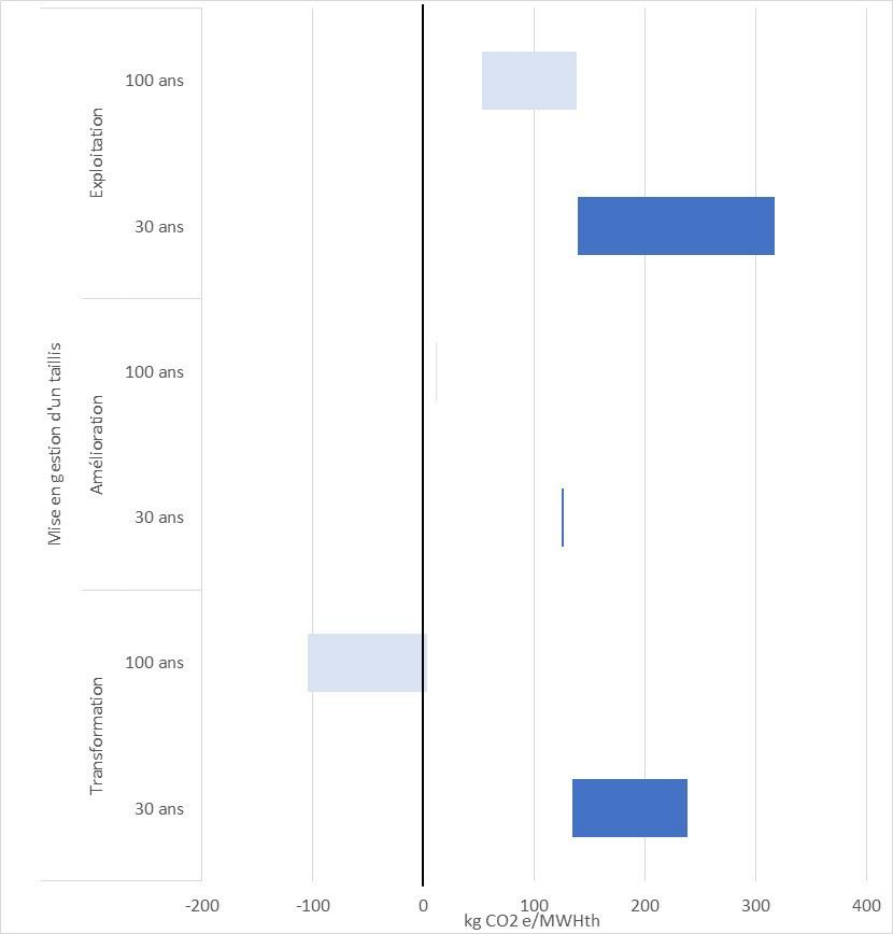
- en **bleu foncé** pour l'horizon temporel à 30 ans ;
- en **bleu clair** pour l'horizon temporel à 100 ans.

Sur base de l'analyse de cette figure il est possible de mentionner que :

- <u>Pour l'exploitation d'un taillis</u>
  - Pour les deux horizons de temps étudiés, la somme des stocks de carbone dans les produits et en forêt du scénario étudié est toujours inférieure aux stocks de carbone en forêt du scénario de référence.
  - À noter que comme présenté dans les chapitres précédents :
    - La productivité du taillis (modélisée ici à travers une variante sur la fertilité) est également un paramètre important : plus le taillis exploité est productif, plus la récolte de bois sera élevée et donc plus l'impact négatif sur les stocks de carbone en forêt rapporté au m³ de bois prélevé sera faible.
    - L'utilisation plus élevée du bois récolté en bois matériau (passage de 30 % à 70 %) par rapport au bois destiné à l'énergie entraine une diminution significative de l'impact négatif sur les stocks de carbone en forêt.
- <u>Pour l'amélioration du taillis</u>
  - À 30 ans, le scénario d'amélioration du taillis a un impact négatif sur les stocks de carbone en forêt.
  - À 100 ans, l'amélioration, générant des produits utilisés en énergie et en matériau, maintient le même niveau de stock de carbone (en intégrant la forêt et les produits bois) que le scénario de référence.
- <u>Pour la récolte d'un taillis dépérissant et sa transformation</u>
  - À court terme, la récolte d'un taillis dépérissant et sa transformation génère un impact négatif par rapport au scénario de référence.
  - Le bilan s'améliore fortement avec le temps avec des bénéfices notables à 100 ans associés à la séquestration progressive du carbone en forêt via les essences plantées et la séquestration carbone dans les produits bois qui en découle.
  - À noter que comme présenté dans les chapitres précédents :
    - Plus le taillis est dépérissant, plus la transformation est intéressante.
    - La transformation présente un bilan d'autant plus positif que la productivité de l'essence plantée est élevée et que l'utilisation en bois matériau est élevée.
  - Le carbone du sol n'est pas intégré dans ces analyses :

    C'est une limite importante sur cette famille de scénarios car la mise en place des plantations s'accompagne d'une coupe rase avec travail du sol, une pratique qui peut impacter négativement le carbone du sol à court terme.

Figure 106 : Contribution des GES d'origine biogénique au changement climatique pour la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières produites à partir de biomasse issue de différents types de gestion sylvicole – Cas-type 1 - Mise en gestion d'un taillis



Note : un bilan GES supérieur à zéro représente une augmentation de carbone dans l'atmosphère par rapport à la situation de référence (soit par une réduction des puits de carbone soit par une émission de GES). Un bilan GES inferieur à zéro réduit la quantité de GES atmosphérique par un renforcement des puits de carbone dans le réservoir forestier par rapport à la référence.

Cas-type 2 - Récolte accrue de produits annexes à la récolte de bois d'œuvre

La figure ci-dessous présente la contribution des GES d'origine biogénique au changement climatique pour la production d'1 MWh_{th} de chaleur dans une chaufferie alimentée par des plaquettes forestières dont la biomasse est issue de différents types de gestion sylvicole :

- la récolte en futaie résineuse :
  - des souches,
  - des houppiers/tiges de faible diamètre,
  - des menus bois ;
- la récolte des menus bois en futaie feuillue.

La contribution totale est présentée sous la forme d'une gamme de valeurs :

- en **jaune foncé** pour l'horizon temporel à 30 ans ;
- en **jaune clair** pour l'horizon temporel à 100 ans.

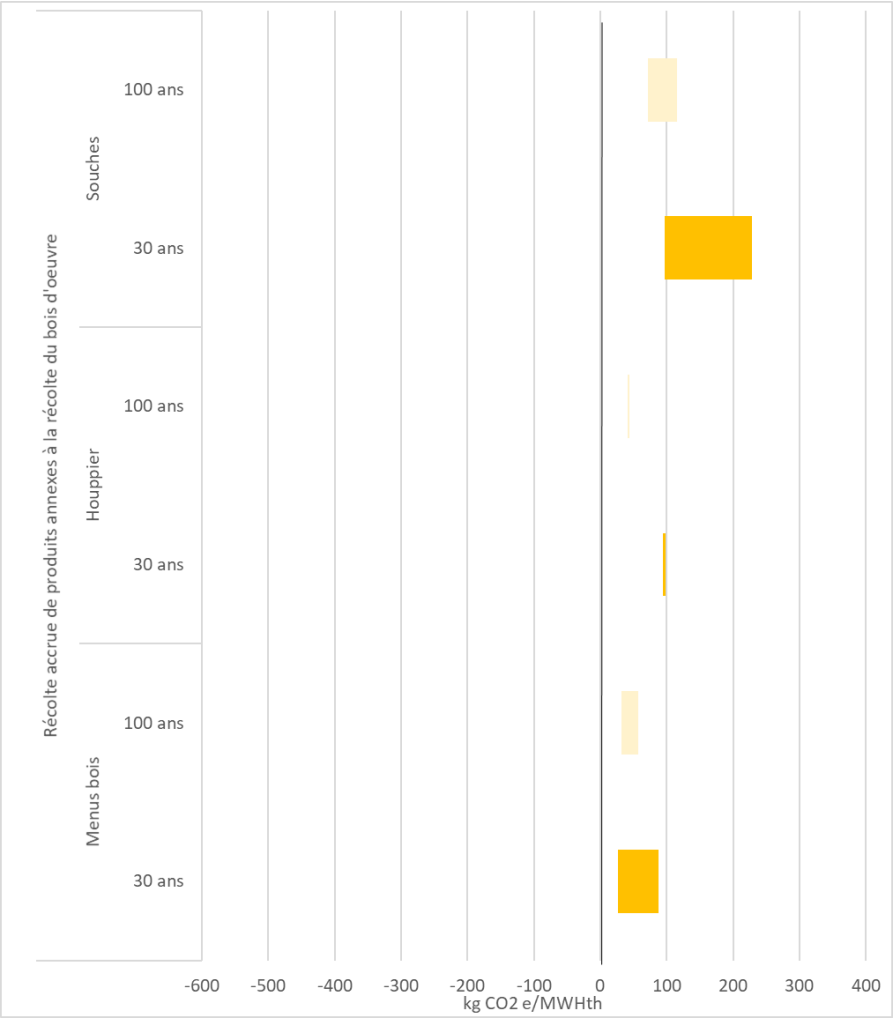
Sur base de l'analyse de cette figure il est possible de mentionner que :

- <u>Pour la récolte des souches</u>
  - La récolte des souches a un impact négatif à court terme sur les stocks de carbone dans le bois mort en forêt par rapport au scénario de référence.
  - Cet impact négatif s'amenuise à long terme et dépend fortement du taux de dégradation des souches si elles n'étaient pas récoltées. Cependant, à long terme un impact négatif sur les stocks de carbone dans la matière organique des sols est considéré.
- <u>Pour la récolte de l'ensemble du houppier / tige faible diamètre</u>

- La récolte de l'ensemble du houppier, BIBE et 70 % menus bois, par rapport à sa non-récolte, a un impact négatif sur les stocks de carbone dans le bois mort en forêt par rapport au scénario de référence.
- Cet impact négatif s'amenuise à long terme.

- <u>Pour la récolte des menus bois en futaie résineuse</u>
  - La récolte des menus bois en futaie résineuse a un impact négatif à court terme sur les stocks de carbone dans le bois mort en forêt.
  - Cet impact négatif s'amenuise à long terme et dépend fortement du taux de dégradation des menus bois s'ils n'étaient pas récoltés. Cependant, à long terme, un impact négatif sur les stocks de carbone dans la matière organique des sols est considéré.
- <u>Pour la récolte des menus bois en futaie feuillue</u>
  - La récolte des menus bois en futaie feuillue a un impact négatif à court terme sur les stocks de carbone dans le bois mort en forêt.
  - Cet impact négatif s'amenuise à long terme et dépend fortement du taux de dégradation des menus bois s'ils n'étaient pas récoltés. Cependant, à long terme, un impact négatif sur les stocks de carbone dans la matière organique des sols est considéré.

Figure 107 : Contribution des GES d'origine biogénique au changement climatique pour la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières produites à partir de biomasse issue de différents types de gestion sylvicole – Cas-type 2 - Récolte accrue de produits annexes à la récolte du bois d'œuvre



Note : un bilan GES supérieur à zéro représente une augmentation de carbone dans l'atmosphère par rapport à la situation de référence (soit par une réduction des puits de carbone soit par une émission de GES). Un bilan GES inferieur à zéro réduit la quantité de GES atmosphérique par un renforcement des puits de carbone dans le réservoir forestier par rapport à la référence.

Cas-type 3 - Plantation sur déprise agricole

La figure ci-dessous présente la contribution biogénique au changement climatique pour la production d'1 MWh_{th} de chaleur dans une chaufferie alimentée par des plaquettes forestières, dont la biomasse est issue de différents types de gestion sylvicole :

- la transformation d'une déprise agricole en TCR (scénario de référence boisement spontané du Label bas-carbone) ;
- la transformation d'une déprise agricole en TCR (scénario de référence taillis de bouleau) ;
- la transformation d'une déprise agricole en futaie de résineux ;
- la transformation d'une déprise agricole en futaie feuillue.

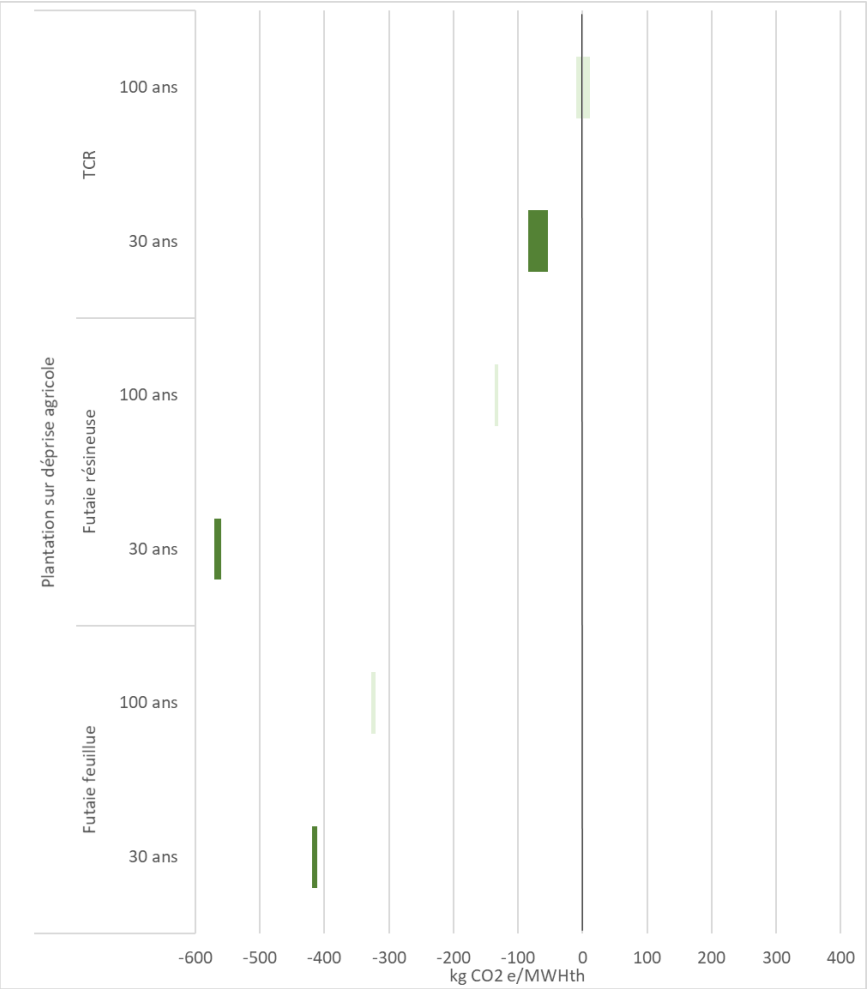
La contribution totale est présentée sous la forme d'une gamme de valeurs :

- en **vert foncé** pour l'horizon temporel à 30 ans ;
- en **vert clair** pour l'horizon temporel à 100 ans.

Sur base de l'analyse de cette figure il est possible de mentionner que :

- Le boisement de terres en déprise agricole par différents types de plantations, des TCR d'eucalyptus, une futaie résineuse ou feuillue, permet de **stocker plus de carbone** par rapport au scénario de référence à 30 ans.
- Cet impact positif se réduit avec le temps et notamment pour le TCR. Ceci peut s'expliquer par le fait que le boisement spontané du scénario de référence continue sa croissance, tandis que les boisements des scénarios projet sont soumis à des coupes.
- Les scénarios de boisement en futaie (feuillue ou résineuse) présentent un meilleur bilan que le TCR du fait du stockage supérieur en forêt et dans les produits.

Figure 108 : Contribution des GES d'origine biogénique au changement climatique pour la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières produites à partir de biomasse issue de différents types de gestion sylvicole – Cas-type 3 - Plantation sur déprise agricole



Note : un bilan GES supérieur à zéro représente une augmentation de carbone dans l'atmosphère par rapport à la situation de référence (soit par une réduction des puits de carbone soit par une émission de GES). Un bilan GES inferieur à zéro réduit la quantité de GES atmosphérique par un renforcement des puits de carbone dans le réservoir forestier par rapport à la référence.

6.2. Bilan GES biogénique et fossile

Dans ce paragraphe, les résultats de cette partie 3 sont intégrés aux résultats de la partie 1, centrée sur les émissions de GES fossiles associées à l'ensemble du cycle de vie (intégrant l'utilisation d'énergie pour la sylviculture, l'exploitation forestière, le transport du bois et la transformation éventuelle en plaquettes, granulés ou autres jusqu'à la production d'énergie et la gestion de cendres).

6.2.1. Correspondance entre les scénarios

Le tableau ci-dessous présente l'association entre les scénarios de récolte accrue de biomasse étudiés en partie 3 et les variantes étudiées en partie 1.

Tableau 111 : Présentation de la combinaison des scénarios partie 3 et variante partie 1 utilisée

GES d'origine biogénique généré par la gestion sylvicole en contexte de développement des prélèvements en forêt				GES d'origine fossile généré par la gestion sylvicole		
Scénario étudié dans la partie 3		Description du scénario		Variante étudiée dans la partie 1		
	Sc_Déprise_FutFeuil_Label	Transformation d'une déprise agricole en futaie feuillue		*Variante B*	*Futaie de résineux*	*Exploitation*
	Sc_Déprise_FutRes_Label	Transformation d'une déprise agricole en futaie de résineux		Variante B	Futaie de résineux	Exploitation
	Sc_Déprise_TCR_Bouleau	Transformation d'une déprise agricole en TCR (bouleau)		Variante H	Déprise agricole	Transformation en taillis courte rotation (eucalyptus)
	Sc_Déprise_TCR_Label	Transformation d'une déprise agricole en TCR selon le scénario de référence du Label bas-carbone				
	Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1	Récolte des menus bois en futaie feuillue	avec une dégradation moyenne des MB	Variante G	Futaie feuillus	Récolte des menus bois
	Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2		avec une dégradation forte des MB			
	Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3		avec une dégradation faible des MB			
	Sc_FutRes_Exploit_MB_1	Récolte des menus bois en futaie résineuse	avec une dégradation moyenne des MB	Variante C	Futaie de résineux	Récolte des menus bois
	Sc_FutRes_Exploit_MB_2		avec une dégradation forte des MB			
	Sc_FutRes_Exploit_MB_3		avec une dégradation faible des MB			
	Sc_FutRes_Exploit_MB_4	Récolte raisonnée des menus bois en futaie résineuse				
	Sc_FutRes_Exploit_Houppier	Récolte des houppiers en futaie résineuse avec un scénario de référence de non-récolte du houppier		Variante B	Futaie de résineux	Exploitation
	Sc_FutRes_Exploit_Souch_1	Récolte des souches en futaie résineuse	avec une dégradation moyenne des souches	Variante D	Futaie de résineux	Récolte des souches
	Sc_FutRes_Exploit_Souch_2		avec une dégradation forte des souches			
	Sc_FutRes_Exploit_Souch_3		avec une dégradation faible des souches			

Note : Les *variantes en grisé et italique* sont des approximations et ne correspondent pas tout à fait au scénario étudié dans la partie 3.

GES d'origine biogénique généré par la gestion sylvicole en contexte de développement des prélèvements en forêt				GES d'origine fossile généré par la gestion sylvicole		
Scénario étudié dans la partie 3		Description du scénario		Variante étudiée dans la partie 1		
	Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1	Transformation d'un taillis capitalisé (mature) dépérissant (-35 %) en futaie de résineuse de fertilité moyenne à haute		Variante E	Taillis de feuillus	Transformation en futaie de douglas
	Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2	Transformation d'un taillis capitalisé (mature) à l'équilibre en futaie résineuse de fertilité moyenne à haute				
	Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3	Transformation d'un taillis capitalisé (mature) fortement dépérissant (-50 %) en futaie résineuse de fertilité moyenne à haute				
	Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4	Transformation d'un taillis capitalisé (mature) dépérissant (-35 %) en futaie résineuse de fertilité basse à moyenne				
	Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5	Transformation d'un taillis capitalisé (mature) dépérissant (-35 %) en futaie feuillue de fertilité haute				
	Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio	Amélioration d'un taillis en croissance		*Variante A*	*Taillis de feuillus*	*Mise en exploitation*
	Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1	Exploitation d'un taillis en croissance	de fertilité haute	Variante A	Taillis de feuillus	Mise en exploitation
	Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2		de fertilité moyenne			
	Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3	Exploitation d'un taillis de fertilité haute en croissance - variante utilisation matériau		Variante A	Taillis de feuillus	Mise en exploitation

Note : Les *variantes en grisé et italique* sont des approximations et ne correspondent pas tout à fait au scénario étudié dans la partie 3.

Notons que toutes les variantes n'ont pas été étudié pour l'ensemble des scénarios en partie 3. Par exemple : le niveau de dépérissement a été étudié pour la transformation mais pas sur la remise en exploitation des taillis ou l'amélioration ; la variabilité sur le taux de dégradation du bois mort a été étudié pour le menus bois et non pas pour le scénario houppier ; la variabilité sur le niveau d'accroissement du boisement spontané a été évalué pour les TCR mais non pas pour les autres scénarios de plantation.

6.2.2. Résultats et interprétation

Les scénarios présentés dans le tableau ci-dessus ont été regroupés suivant les trois cas-types présentés en début de section.

Les bilans GES biogénique et fossile de la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles, permettant une augmentation de la récolte du bois énergie sont présentés dans le Tableau 112 et Figure 109. Les valeurs pour les deux bilans sont présentées séparément à savoir par une gamme de valeur pour le bilan GES biogénique (représenté par la gamme de valeur en couleur sur la Figure 109) et par une valeur unique pour le bilan GES fossile (représenté par le tiret noir sur la Figure 109).

L'analyse de ces deux éléments permet de déterminer que :

- pour la **mise en gestion d'un taillis**, la contribution des GES d'origine fossile au sein de ce bilan GES total:
  - est faible (~12 kg CO_2 éq./MWh_{th}) pour le scénario d'amélioration du taillis à 30 ans et devient élévée pour un horizon temporel plus long ;
  - est faible (~12 kg CO_2 éq./MWh_{th}) pour le scénario d'exploitation à 30 ans et non négligeable pour un horizon temporel plus long ;
  - est faible (~12 kg CO_2 éq./MWh_{th}) pour le scénario de transformation à 30 ans et devient élevée pour un horizon temporel plus long.
- pour la **récolte accrue de produits annexes à la récolte du bois d'œuvre**, la contribution des GES d'origine fossile au sein de ce bilan GES total:
  - est non négligeable (~32 kg CO_2 éq./MWh_{th}) par rapport au différentiel de stockage de carbone lors de la récolte accrue de souches en futaie résineuse et cela surtout pour un horizon temporel plus long ;

- est non négligeable (~17 kg CO_2 éq./MWh_{th}) par rapport au différentiel de stockage de carbone lors de la récolte de l'entièreté du houppier en futaie résineuse et cela surtout pour un horizon temporel plus long ;
- est non négligeable (~12 kg CO_2 éq./MWh_{th}) par rapport au différentiel de stockage de carbone lors de la récolte de menus bois en futaie résineuse ou en futaie feuillue et cela surtout pour un horizon temporel plus long.

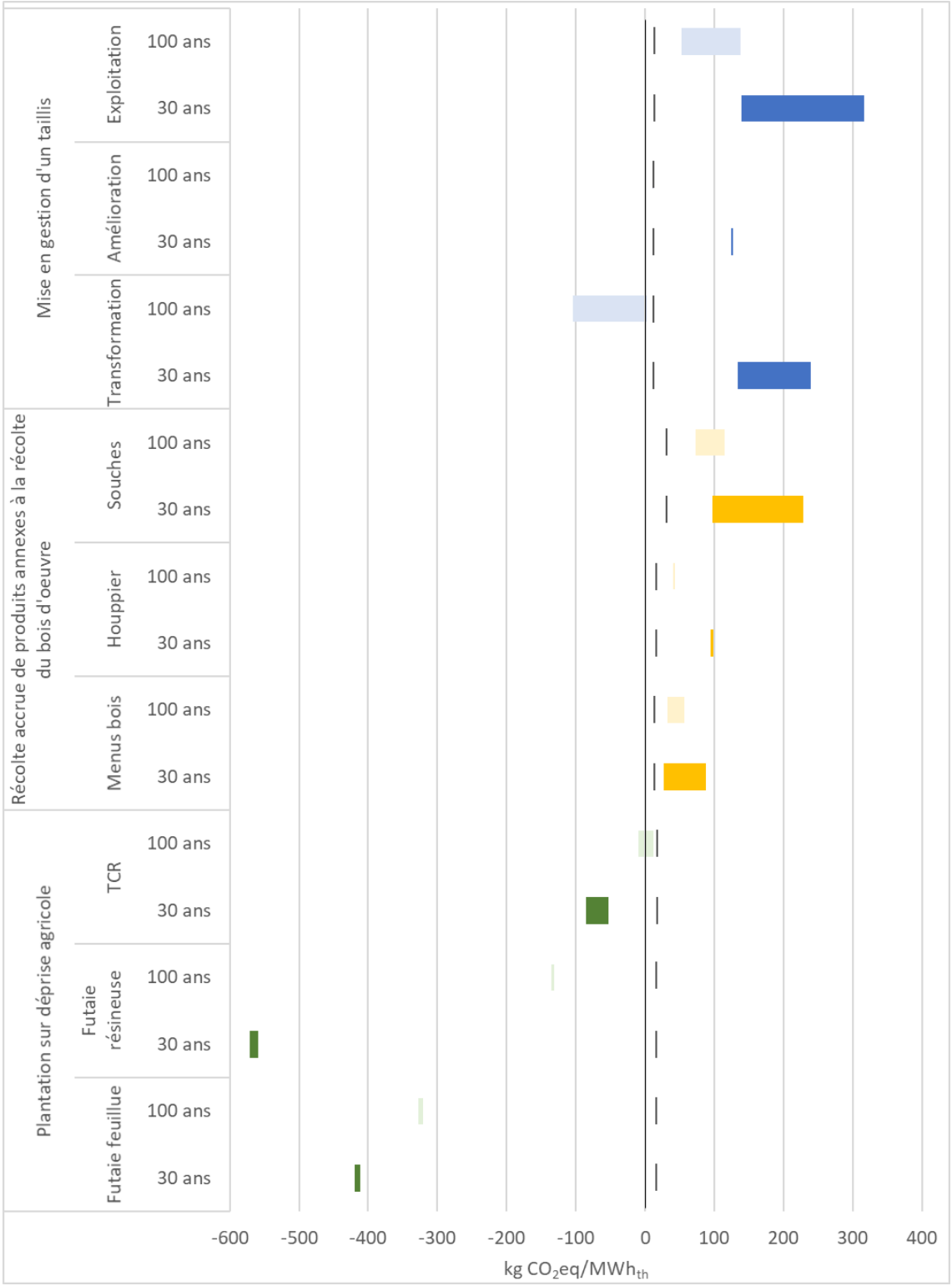
- pour la **plantation sur déprise agricole**, la contribution des GES d'origine fossile au sein de ce bilan GES total:
  - est faible (~18 kg CO_2 éq./MWh_{th}) par rapport au stockage de carbone lors du boisement en futaie,
  - est non négligeable (~19 kg CO_2 éq./MWh_{th}) par rapport au stockage de carbone lors du boisement en TCR.

Tableau 112 : Bilans GES biogénique et fossile de la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles, permettant une augmentation de la récolte du bois énergie

Valeurs en kg CO_2 éq./MWh_{th}			GES fossile	GES biogénique	
				min	max
Mise en gestion d'un taillis (cas-type 1)	Transformation	30 ans	12,3	121	226
		100 ans	12,3	-117	-9,2
	Amélioration	30 ans	*12,3*	113	
		100 ans	*12,3*	-1,6	
	Exploitation	30 ans	12,3	127	304
		100 ans	12,3	40,1	126
Récolte accrue de produits annexes à la récolte du bois d'œuvre (cas-type 2)	Menus bois	30 ans	11,2-12,7	13,6	76,8
		100 ans	11,2-12,7	19,0	46,0
	Houppier	30 ans	16,9	79,2	
		100 ans	16,9	25,2	
	Souches	30 ans	31,6	65,3	197
		100 ans	31,6	40,8	83,5
Plantation sur déprise agricole (cas-type 3)	Futaie feuillue	30 ans	*16,9*	-423	
		100 ans	*16,9*	-335	
	Futaie résineuse	30 ans	16,9	-570	
		100 ans	16,9	-145	
	TCR	30 ans	18,2	-103	-71,7
		100 ans	18,2	-28,1	-6,5

Note : Les valeurs *en grisé et italique* sont des approximations car ces situations sylvicoles (du lot 2) n'ont pas été étudiées dans le lot 1. Pour le scénario d'amélioration d'un taillis remis en gestion, les valeurs du scénario d'exploitation en taillis ont été utilisées. Pour le scénario de plantation d'une futaie feuillue sur déprise agricole, les valeurs pour la plantation d'une futaie résineuse ont été considérées.

Figure 109 : Bilans GES biogénique (barre de couleur) et fossile (ligne noire) de la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles, permettant une augmentation de la récolte du bois énergie



7. Conclusions

Conclusion 18 : **L'étude confirme que les ordres de grandeur des variations de carbone dans les écosystèmes associés à la récolte accrue de bois en forêt influent de façon significative le bilan GES de la production d'énergie à partir de plaquettes forestières. La variation des puits de carbone est donc un élément du bilan important à prendre en compte.**

Au regard du bilan GES total (biogénique + fossile) de la production d'énergie à partir de plaquettes forestières issues d'une augmentation de la récolte de bois, la gestion sylvicole a une influence significative sur les résultats et engendre une grande variabilité telle que présentée sur la figure ci-dessous.

Cette variabilité est fonction :

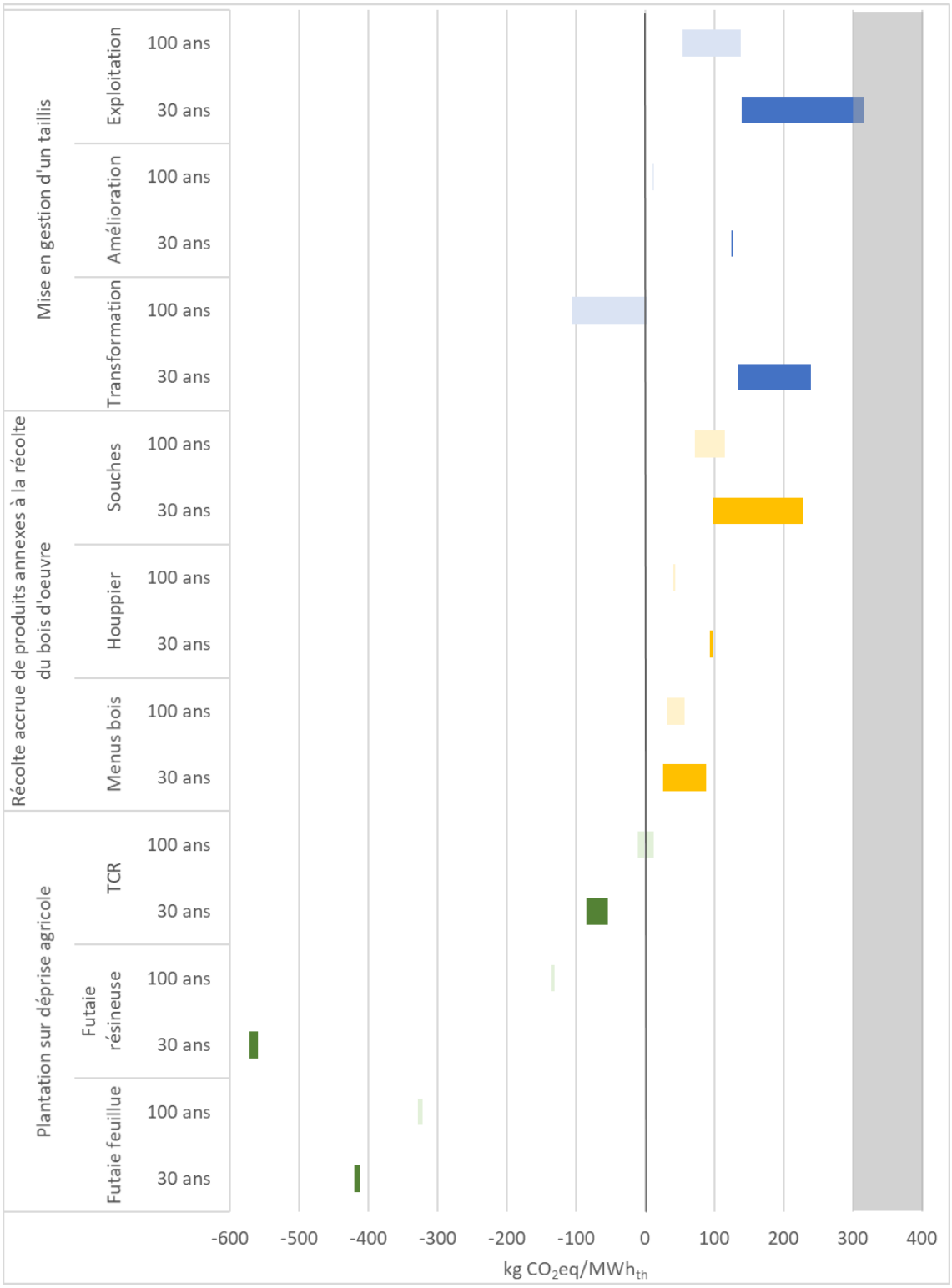
- du système de gestion sylvicole mis en œuvre :
  - la mise en gestion d'un taillis en **bleu** (cas-type 1),
  - la récolte accrue de produits annexes à la récolte de bois d'œuvre en **jaune** (cas-type 2),
  - la plantation sur déprise agricole en **vert** (cas-type 3) **;**
- de l'horizon de temps considéré :
  - en couleur foncée l'horizon à 30 ans (court-terme),
  - en couleur claire l'horizon à 100 ans (moyen-terme) ;
- du scénario de référence considéré.

Au sein de ce bilan GES total (illustré à la Figure 110), la contribution des GES d'origine fossile est faible (entre 11 et 32 $kgCO_2$ éq./MWh_{th} selon le scénario sylvicole) par rapport à la contribution du GES d'origine biogénique.

L'ordre de grandeur des variations de carbone biogénique est significatif dans le bilan GES total. L'interprétation des résultats doit se faire en tenant compte des limites de l'étude relatives aux données et à la méthodologie (voir section 5, Limites).

Ainsi, les résultats pour les cas-types étudiés montrent que le bilan GES (biogénique et fossile) de la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières, dans un contexte d'augmentation de la récolte de bois, est plus faible que le bilan GES de la production de la même quantité d'énergie à partir de gaz, sauf dans un cas. En effet, ce résultat s'observe pour l'ensemble des scénarios étudiés intégrant une augmentation de la récolte de bois, sauf pour le résultat à 30 ans du scénario de remise en gestion des taillis existants en maintenant un système d'exploitation en taillis. Dans ce dernier cas, on trouve un recouvrement entre les bilans GES totaux pour la production d'1 MWh de chaleur en chaufferie alimentée par du bois et par du gaz (zone grisée sur la figure ci-dessous). Ces premières comparaisons restent exploratoires compte tenu des limites à l'approche adoptée.

Figure 110 : Bilan GES total[152] (barre de couleur = biogénique + fossile) de la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles, permettant une augmentation de la récolte du bois énergie.



Note : La zone grisée correspond à la fourchette d'émissions GES de la filière gaz naturel (cf. partie 2). Le maximum de cette fourchette correspond à la variante avec des fuites de méthane élevées, et le minimum correspond à un haut rendement de la chaufferie gaz et à de faibles fuites de méthane.

[152] Ici, un bilan GES supérieur à zéro représente une augmentation de carbone dans l'atmosphère par rapport à la situation de référence (soit par une réduction des puits de carbone soit par une émission de GES). Un bilan GES inferieur à zéro réduit la quantité de GES atmosphérique par un renforcement des puits de carbone dans le réservoir forestier par rapport à la référence.

Tableau 113 : Bilan GES total (biogénique + fossile) de la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles, permettant une augmentation de la récolte du bois énergie.

Valeurs en kg CO_2 éq./MWh_{th}			Bilan GES total (fossile + biogénique)	
			min	max
Mise en gestion d'un taillis	Transformation	30 ans	134	239
		100 ans	-105	3
	Amélioration	30 ans	125	
		100 ans	11	
	Exploitation	30 ans	139	317
		100 ans	52	138
Récolte accrue de produits annexes à la récolte du bois d'œuvre	Menus bois	30 ans	26	88
		100 ans	32	57
	Houppier	30 ans	96	
		100 ans	42	
	Souches	30 ans	97	228
		100 ans	72	115
Plantation sur déprise agricole	Futaie feuillue	30 ans	-406	
		100 ans	-318	
	Futaie résineuse	30 ans	-553	
		100 ans	-128	
	TCR	30 ans	-85	-54
		100 ans	-10	12

Le bilan GES est meilleur pour les horizons de temps longs que sur des horizons courts pour le bois issu de forêts existantes.

- À court terme (30 ans), le bilan GES de la production d'énergie à partir de plaquettes issues des scénarios d'augmentation de récolte sur la forêt existante (cas-type 1 et 2) est dégradé, car les dynamiques de stockage de carbone sont inférieures au scénario de référence. C'est la remise en gestion des taillis en maintenant un système d'exploitation en taillis qui présente le bilan GES le plus dégradé. Inversement, les plantations sur déprise agricole (cas-type 3) représentent un bilan GES amélioré, car les dynamiques de stockage de carbone sont supérieures au scénario de référence.
- À plus long terme (100 ans), le bilan GES de la production d'énergie à partir de plaquettes issues des scénarios d'augmentation de la récolte sur des forêts existantes (cas-types 1 et 2) s'améliore. L'impact sur les GES atmosphériques à 30 ans est toujours supérieur à celui à 100 ans, celui-ci prenant en compte une reconstitution plus avancée des stocks de carbone dans les écosystèmes après la récolte accrue du bois. Le bilan GES devient positif pour la transformation et presque neutre pour la conversion. Il demeure toujours négatif pour les scénarios de mise en exploitation des taillis en maintenant un système de taillis et pour le scénario de récolte des produits annexes. Inversement, pour les scénarios de plantation sur déprise agricole (cas-type 3), l'absorption nette se réduit avec le temps, lié aux dynamiques de croissance des peuplements et aux réémissions du carbone lors de récoltes du bois.

L'échelle de temps considérée dans l'analyse est un élément important. Pour éclairer les décisions, la contribution des actions a l'atténuation du changement climatique à court terme doit être mise en regard avec leur contribution à moyen et long terme. Les horizons de temps de la foret – plusieurs décennies voire siècles s'articulent avec ceux du changement climatique et l'objectif de neutralité carbone en 2050.

La définition du scénario de référence joue fortement sur les résultats.

L'évolution des stocks de carbone dans le scénario de référence par rapport auquel on compare le scénario projet étudié a également une influence importante sur les résultats. Ainsi, selon que le taillis soit très dépérissant ou à l'équilibre, l'impact d'une transformation de ce taillis varie de plus ou moins 40 %. Pour le cas-type 2, le taux de dégradation du bois mort fait varier les résultats de plus ou moins 50 %. Pour ce qui est des scénarios de déprise agricole, selon le dynamisme du boisement naturel par rapport auquel on compare la plantation de TCR, les résultats peuvent varier de +400 % à l'horizon de temps 30 ans et à 100 % à l'horizon de temps 100 ans.

Conclusion 19 : **Les résultats confirment les recommandations actuelles sur les pratiques de gestion forestières : l'intérêt de favoriser des systèmes bois énergie croisés avec une production de bois matériau, la nécessité de prendre en considération les spécificités des parcelles (stock de carbone initial, fertilité et productivité), ainsi que l'enjeu des stocks de carbone dans les sols**

L'analyse développée montre qu'elle peut éclairer les choix sur les pratiques de gestion forestière. Ainsi on constate sur l'ensemble des scénarios les phénomènes suivants permettant de dégager des recommandations sur les pratiques sylvicoles :

- La complémentarité des usages énergie et matériau est un élément clé à préserver :

  Les systèmes de futaie produisant du bois d'œuvre présentent un niveau plus élevé de stockage de carbone en forêt par rapport aux systèmes d'exploitation en taillis. Favoriser l'usage en matériau permet également d'augmenter les stocks de carbone dans les produits bois et donc de « compenser » en partie la réduction de stocks de carbone dans les écosystèmes liée à la récolte accrue dans les forêts existantes. Ainsi, la variante qui optimise les débouchés en matériaux, sur le scénario de remise en gestion d'un taillis, permet de diminuer l'impact de la mise en exploitation de 30 %. Le stock de carbone dans les produits bois permet également d'améliorer le bilan GES de la conversion et transformation d'un taillis. En corollaire, les systèmes d'exploitation en taillis dédiées uniquement à l'énergie sur les forêts existantes, génèrent un bilan GES plus mitigé que des alternatives incluant des débouchés matériaux.
- La restauration des forêts dépérissantes est une piste intéressante pour engendrer des débouchés de bois énergie à impact climatique réduit :

  Plus les taillis sont dépérissant, plus leur remise en gestion est intéressante d'un point de vue carbone à condition de développer des peuplements en bonne santé. Le dépérissement sera plus avéré si les essences en place ne sont pas adaptées aux conditions de station. À l'inverse, la transformation des taillis capitalisés en bonne santé présente un bilan GES plus mitigé à court terme, même si le bilan à long terme reste positif. Il faut donc rester attentif à l'utilisation de techniques pour limiter la perte de stock carbone dans les écosystèmes à court terme avant la reconstitution des peuplements.
- Il est plus intéressant de remettre en exploitation les parcelles qui promettent une plus grande productivité des peuplements forestiers :

  Plus les conditions pédoclimatiques sont favorables à la productivité forestière, plus la récolte de bois à l'ha est importante, et donc plus l'impact des variations de carbone dans les écosystèmes rapporté au m³ de bois prélevé est faible. La remise en gestion des parcelles à plus faible potentiel de production de bois présente un bilan GES moins favorable. Cette recommandation doit toutefois être confrontée à la question d'assurer la résilience face au changement climatique de ces parcelles « moins productives ».
- Le maintien de la fertilité et de la teneur en carbone des sols, ainsi que la préservation de la biodiversité, sont des enjeux à approfondir, bien qu'ils n'aient pas pu être pris en compte dans l'ACV de façon satisfaisante :

  Les scénarios intégrant une récolte du houppier sont plus favorables d'un point de vue carbone que les scénarios de récolte de menus bois et souches, notamment à long terme, du fait des impacts potentiels sur le carbone du sol. Notons que la récolte de menus bois et souches peut altérer la fertilité des sols et donc à terme aussi la séquestration liée à la croissance forestière. Cet effet n'a pas été pris en compte dans l'étude et les résultats peuvent donc être sous-estimées. Les résultats des scénarios sur la récolte de menus bois et souches doivent s'accompagner des recommandations données par d'autres études soutenues par l'ADEME (projet GERBOISE) afin de limiter leurs impacts sur la fertilité des sols et la biodiversité.
- Créer des systèmes forestiers productifs dans les zones de déprise agricole à bonne fertilité peut libérer des gisements de bois énergie intéressants.

  Un bilan GES positif des plantations sur déprise agricole est d'autant plus intéressant que la croissance du boisement spontané est faible. Dans ces situations, la création des systèmes de futaies est à favoriser par rapport aux Taillis à Court Rotation (TCR), car les systèmes forestiers ainsi créés favoriseraient la séquestration de carbone en forêt et permettraient des valorisations en bois matériau ainsi qu'en bois énergie.

8. Limites et besoins de recherche complémentaires

Cette étude constitue un premier pas, qui en appellent d'autres, afin d'affiner la compréhension des enjeux traités. Certains approfondissements intéressants à mener nous sont apparus au cours des travaux. Ils sont retranscrits dans cette partie, organisés en 11 points, portant sur la méthode, les données et les re-contextualisations indispensables de ces travaux.

8.1. La méthode ILCD appliquée dans l'étude permet des analyses pertinentes qui pourraient être complétées

Point 1 : L'intérêt de déployer les analyses sur plus d'horizons temporels que 30 ans et 100 ans.

Dans cette étude on analyse les variations de carbone sur des parcelles en se plaçant (via la définition du t_0) au moment où le scénario projet s'écarte du scénario de référence. Le t_0 est donc le moment où la décision de changer la gestion sylvicole commence à avoir un impact sur le climat.

La méthode ILCD a été appliquée à deux horizons de temps à partir du t_0: 30 ans et 100 ans. Il serait intéressant de la déployer la méthode à des échelles plus larges que la parcelle (voir point 2) et sur des années intermédiaires de manière à suivre la dynamique de diminution de l'impact climatique.

Cette approche annualisée et à des échelles larges permettrait également de mieux appréhender les inévitables effets de seuil de la méthode à la parcelle appliquée à 30 et 100 ans. En effet, toutes les années n'ont pas le même impact : notamment l'inclusion ou non de l'année à laquelle a lieu la coupe finale est centrale car elle dégage du volume de bois énergie et modifie l'équilibre des stocks de carbone. Son inclusion ou non dans l'horizon de temps d'analyse joue donc sensiblement sur les résultats.

La méthode ILCD a également été appliquée à un stock moyen à l'infini. Ce calcul permet de s'affranchir des effets de seuil mais il ne permet pas de traduire la temporalité de l'impact des changements de pratiques sylvicoles. Dans ce calcul, les stocks de carbone dans le scénario projet correspondent aux stocks moyens sur la durée de la rotation (ce qui est égal aux stocks à l'équilibre si la gestion sylvicole est reproduite à l'infini) et l'infini a été fixé à 200 ans pour le scénario de référence. Ce choix influe sur la moyenne retenue pour le scénario de référence. Nous aurions pu faire des calculs des stocks moyens du scénario de référence sur la durée d'une révolution du scénario projet afin de se positionner toujours aux mêmes horizons de temps pour les deux scénarios.

Une certaine temporalité aurait pu ainsi être dégagée en regardant les stocks moyens sur la première révolution sur les deux scénarios (référence/projet) rapportées à la récolte de bois sur une révolution, les stocks moyens sur deux révolutions (référence/projet) rapportées à la récolte sur deux révolutions, etc.

D'autres méthodes auraient pu être utilisées comme l'ACV dynamique telle que présentée dans la publication (Levasseur et al., 2016).

Point 2 : L'analyse à la parcelle doit être élargie à un paysage ou un massif.

Une modification des pratiques sylvicoles, c'est-à-dire le passage du scénario de référence au scénario projet, entraine une modification des flux de carbone à l'échelle de la parcelle mais également à l'échelle du massif/paysage (voir tableau 91). L'analyse à des échelles plus larges (massif/régionale/nationale) permettent d'éviter les effets de seuil de la modélisation à l'échelle de la parcelle appliquée à 30 et 100 ans, dépendant notamment de la durée de rotation. Des analyses à des échelles plus larges permettraient de prendre en compte la diversité des sylvicultures/essences et des situations de départ à l'échelle des massifs et d'annualiser les résultats.

Pour des raisonnements à l'échelle du paysage ou du massif, des évaluations complémentaires sont cependant nécessaires. En effet, de façon opérationnelle, à l'échelle d'un massif, toutes les parcelles ne vont pas passer du scénario de référence au scénario projet au même moment. À titre d'exemple, pour la mise en exploitation d'un taillis à une révolution de 20 ans, le gestionnaire peut décider de diviser le massif en 20 parcelles et de le mettre en exploitation au rythme d'une parcelle par an. Au bout de 20 ans il aura régularisé l'ensemble de son exploitation avec une stabilisation des stocks de carbone à l'échelle du massif correspondant au stock moyen de la révolution. Notre étude ne fournit donc pas directement les résultats d'impact climatique à l'échelle d'un paysage ou d'un massif mis en gestion : ce niveau de stock dépendra du rythme de mise en œuvre du scénario projet à l'échelle du paysage.

Point 3 : L'intérêt d'inclure des réflexions sur le poids relatif des émissions à court terme et des émissions à long terme.

Les émissions de CO_2 sont considérées avec un impact équivalent qu'elles soient émises demain ou bien plus tard. Il serait intéressant de pondérer les émissions de carbone selon l'horizon temporel où elles sont émises : une tonne de CO_2 émise l'année prochaine, par l'effet d'emballement qu'elle engendre, pourrait être pondérée plus fortement qu'une tonne de CO_2 émise plusieurs années plus tard. Cette pondération permettrait d'exprimer dans les calculs l'urgence climatique et l'importance des actions de réduction des émissions à court terme.

Point 4 : L'allocation des impacts entre les tonnes de bois pour l'énergie et les tonnes de bois pour le matériau a été réalisée par une allocation massique mais d'autres raisonnements peuvent être poussés.

Pour une partie des résultats, à savoir les scénarios où la récolte additionnelle (différentiel de récolte entre le scénario projet et le scénario de référence) est destinée en partie pour les matériaux, et ceux dont l'horizon temporel d'analyse inclut une

récolte pour ces matériaux, se pose la question de l'affectation des impacts entre l'énergie et les matériaux. Les scénarios menus bois/houppier/souches et plantation de TCR ne sont pas concernés par cette limite.

Les impacts en forêt et dans les produits bois sont à affecter entre les différents volumes de bois qui sortent de la parcelle, à savoir entre les m³ de bois qui sont fléchés vers l'énergie et les m³ fléchés vers des usages matériau. Plusieurs possibilités auraient pu être déployées pour réaliser cette allocation. L'étude s'est attachée à définir une allocation massique. Pour ce type d'allocation, la question s'est posée vis-à-vis des stocks dans les produits qui auraient pu être alloués exclusivement aux volumes à destination des usages matériaux. D'autres options pour la résolution de l'affectation pourraient être testées dans des études futures, qui seraient tout à fait pertinentes :

- l'allocation économique ;
- l'élargissement du système utilisé dans le cadre des ACV conséquentielles: on étudie les impacts d'un système { bois énergie + bois matériau } puis on élargit les frontières du système en intégrant un matériau de substitution (par exemple le béton), de manière à annuler la question du matériau dans le système d'évaluation.

Cette question est essentiellement présente pour les analyses à 100 ans sur des scénarios projets produisant du bois d'œuvre où l'on met en place des plantations. Pour les résultats à 30 ans, et la mise en gestion en taillis, l'allocation des impacts entre le bois d'industrie et le bois énergie se pose également bien que le choix d'allocation aura probablement moins de répercussion que pour la production bois d'œuvre car les caractéristiques économiques de ces produits sont plus proches.

8.2. Les données alimentant notamment les scénarios de référence ont besoin de consolidation et pourraient être étoffées de manière à tester plus de scénarios forestiers

Point 5 : La prise en compte des variations du carbone dans les sols et des différents flux contribuant à l'effet de serre doit être améliorée.

Les modifications des pratiques de gestion peuvent entrainer des modifications des stocks de carbone dans les sols. Une revue de la littérature a été menée dans le cadre de ce pour adresser cette question. Deux pratiques sylvicoles apparaissent à risque : la récolte de menus bois et souches (impacts sur le long terme) et la coupe rase suivie d'un travail du sol (impacts notamment sur le court terme). Concernant la récolte de menus bois et souches, des premières estimations chiffrées ont été introduites dans le calculs de l'étude dans les scénarios récoltant 100 % de ces compartiments et dans les résultats sur 100 ans. La revue de la bibliographie ne nous a pas permis de quantifier les éventuels impacts d'une récolte partielle (70 %) des menus bois ou ses éventuels impacts sur le court terme. Les éventuels impacts des coupes rases associées à un travail du sol (nécessaires notamment dans le scénario de transformation de taillis) n'ont pas été intégrés dans les calculs. Par ailleurs, (Achat et al, 2015) montre que la récolte des menus-bois, voire des souches, entraine une baisse de fertilité, donc sur le long terme une baisse de séquestration carbone par la biomasse. Il s'agit d'un impact indirect mais potentiellement fort qui n'a pas été évalué ici.

Des fortes incertitudes restent encore sur les évolutions de carbone dans le sol selon les pratiques sylvicoles ou dans des forêts laissées en évolution naturelle. C'est une question de recherche encore ouverte.

Les flux de GES étudiés dans la partie 3 se limitent au CO_2. D'autres gaz contribuant à l'effet de serre sont émis ou captés par les forêts : méthane, N_2O et composés volatils organiques. Ces éléments ne sont que partiellement pris en compte dans les inventaires nationaux, car peu de données existent à l'heure actuelle (seul le CH_4 et le N_2O associés au brûlage de la biomasse sont intégrés). L'ensemble de ces flux est par ailleurs considéré comme ayant des ordres de grandeurs inférieurs (Morison et al., 2012) (Epron et al., 2016, p. epron) à ceux associés aux transferts de carbone en CO_2. Cependant, du fait du pouvoir de réchauffement global important de ces gaz, des études sont en cours pour mieux prendre en compte les impacts associés à ces émissions.

Par ailleurs, d'autres contributeurs potentiels associés au changement climatiques tels que l'albédo, les émissions d'aérosols et de particules n'ont pas été intégrés à l'étude.

Point 6 : Les scénarios de référence pourraient être consolidés.

Selon la norme ISO 14067, la situation de référence par rapport à laquelle le scénario projet est évalué peut être :

- une pratique routinière ;
- une projection dans l'avenir ;
- une cible ;
- une régénération potentielle naturelle ;
- un scénario de référence historique.

Le choix du scénario de référence est donc un choix stratégique, qui influe fortement sur les résultats. Dans notre étude, pour les familles de scénarios taillis et déprise agricole, les scénarios de référence correspondent à l'évolution du système existant sans action humaine, c'est-à-dire sans gestion des parcelles. Pour la famille de scénarios menus bois et souches, le scénario de référence est la gestion sans prélèvement des menus bois et souches.

Il est apparu au cours de l'étude un manque de données sur l'évolution des stocks de carbone en forêt en cas de non-gestion. Que devient un taillis non géré ? Que devient une parcelle agricole en déprise ? Les données actuelles sont issues de « dires d'experts ». Des travaux complémentaires seraient intéressants pour appuyer et diversifier les données retenues dans cette étude.

Point 7 : Les essences modélisées sont spécifiques. La modélisation d'un plus grand nombre d'essences améliorerait la représentativité des calculs.

Les calculs réalisés se sont appuyés sur les modèles du châtaignier (taillis), du douglas (futaies résineuse) et du chêne (futaies feuillues) traduisant des peuplements mono-spécifiques et une sylviculture régulière. Cette sélection est issue à la fois d'une nécessité de resserrer le nombre d'analyses (que des analyses de sensibilité viennent ensuite étoffer) et d'un accès difficile à des données sur des essences différentes, des peuplements mélangés ou des sylvicultures irrégulières. L'élargissement des essences traitées viendrait consolider la représentativité des situations modélisées. La représentativité est présentée en annexe 18.

Les essences modélisées sont particulièrement productives : les taillis de châtaignier sont plus productifs que des taillis d'autres essences comme le charme ou le chêne ; le douglas est plus productif que d'autres essences résineuses comme les pins. Pour réduire cette limite, différents niveaux de production ont été testés, retranscrits dans des variantes autour du niveau de fertilité. Ainsi des douglas à fertilité basse à moyenne pourraient représenter la croissance d'autres essences résineuses moins productives, et le taillis châtaignier à plus faible fertilité permet de modéliser des essences moins productives.

Les modèles ainsi que les supports informatiques utilisés influent également sur les résultats. Ainsi, les extrapolations réalisées pour le calcul des stocks moyens ont tendance à minimiser les stocks des produits du bois utilisé en matériau et surestimer les stocks des produits du bois utilisé en énergie. De plus, les modèles de billonnage orientant la récolte vers les usages matériaux ou énergies devraient être évalués et comparés afin de ne pas introduire de biais par exemple entre feuillus et résineux par rapport au stockage dans les produits.

Point 8 : L'étude a ciblé les scénarios de mise en gestion / d'évolution de la gestion permettant de récolter plus du bois énergie ou permettant de combiner la récolte additionnelle de bois énergie avec la production de bois matériau à plus long terme.

Des scénarios étudiés ici tels que l'amélioration des taillis en futaie, la transformation des taillis capitalisés en futaie résineuse ou feuillue, ou les scénarios de boisement par plantation pour obtenir une futaie traduisent un objectif de production combinée de bois matériau et de bois énergie. D'autres scénarios comme la mise en exploitation de taillis ou la plantation de TCR sont tournés vers l'obtention de bois énergie.

Des scénarios ont été écartés de l'étude comme l'augmentation du taux de récolte des futaies feuillues ou la modification des révolutions des futaies résineuses. Ces scénarios peuvent être importants en termes de représentativité dans les forêts françaises et en termes de potentiel de récolte.

Point 9 : La prise en compte de la vulnérabilité pourrait être améliorée.

L'étude tient compte de la vulnérabilité de la forêt vis-à-vis des différents aléas (sécheresse, tempêtes, incendies, ravageurs, maladies émergentes) de façon partielle. Dans les scénarios autour des taillis, on considère que ces derniers auraient subi un dépérissement associé à ces aléas s'il n'y avait pas eu de mise en gestion. À l'inverse, du côté des mises en gestion et des plantations, on ne modélise pas de vulnérabilité, alors que cette dernière est également présente.

La question de la prise en compte des effets du changement climatique sur la forêt est une question très importante pour comprendre l'impact climatique des différents types de gestion. Elle doit encore faire l'objet de recherches, pour par exemple adresser les questions suivantes : quelles seront les pertes de stocks de carbone selon la gestion des peuplements ? quels sont les types de sylviculture plus résilients au changement climatiques ? La gestion forestière représente une solution pour maîtriser une partie des risques, grâce au contrôle de la densité et de l'âge des peuplements, à l'adaptation des essences aux conditions de station qui évoluent et au suivi de l'état sanitaire. Par ailleurs, le maintien d'une gestion assure l'entretien des capacités de réponse en cas de crise majeure. Cependant, laisser certaines surfaces en libre évolution (sans intervention) contribue à diversifier les modes de gestion et à favoriser la résilience des peuplements. Toutefois, selon les territoires, l'adaptation active pourra tout de même être nécessaire, du fait d'un dépérissement et d'une mortalité importante, de l'absence de régénération naturelle ou pour un enjeu économique.

8.3. Les résultats présentés doivent être contextualisés

Point 10 : L'analyse déployée dans ces travaux ne peut pas répondre à toutes les questions : des analyses de cycle de vie conséquentielles sont nécessaires pour évaluer l'ensemble des conséquences d'une décision.

L'analyse déroulée ici présente un impact climatique sans prendre en compte des conséquences sur des systèmes qui pourraient être modifiés par un fort développement du bois énergie collectif et industriel. On ne considère pas dans cette approche :

- une éventuelle évolution des parts de marché du bois issu des forêts pour usage matériau sur le marché des matériaux de construction ;
- une éventuelle concurrence entre les débouchés bois énergie et l'industrie des panneaux de bois ou du papier, et les conséquences associées ;
- les implications éventuelles des nouvelles installations bois énergie sur les consommations de bois énergie des particuliers.

Ces questions pertinentes ne sont pas abordées dans l'étude : elles impliquent d'autres modèles, de nature économique, et des réflexions plus « macro » que les approches à la parcelle déployées ici.

L'étude a évalué l'impact climatique de la production d'énergie issue des prélèvements additionnels de bois en forêt pour l'énergie, et dans certains scénarios aussi pour les matériaux. L'étude n'avait pas pour objectif d'évaluer l'impact climatique des matériaux bois ni de ses produits concurrents (ex : béton, acier, etc.). Les résultats de cette étude ne permettent donc pas de conclure sur le bénéficie climatique global des changements de pratiques de gestion en forêt. Ces évaluations globales intégrant l'empreinte des matériaux bois et non bois sont des questions essentielles à approfondir dans des études futures.

Point 11 : Ne pas oublier de resituer l'enjeu carbone avec les autres enjeux environnementaux.

Cette partie 3 se concentre sur la question du carbone et de l'impact climatique. C'est une limite forte qui ne doit pas faire oublier les autres enjeux environnementaux, et également ceux que l'analyse de cycle de vie n'intègre pas bien, tel que l'enjeu de la préservation de la biodiversité. C'est tout un pan de questions qui est donc malheureusement écarté et pour lequel à défaut d'analyses quantitatives, les explications qualitatives des experts doivent être écoutées.

À titre illustratif de l'interférence entre ces questions et l'équilibre de la biodiversité, on peut citer la récolte des menus bois telle que modélisée dans certains scénarios : elle diminue la quantité de bois mort se décomposant en forêt, qui constitue l'habitat de nombreuses espèces. Les plantations mono-spécifiques et régulières avec des essences non autochtones devraient également faire l'objet d'une évaluation sur le sujet du maintien de la biodiversité.

PARTIE 4 : POSITIONNEMENT DE L'ETUDE PAR RAPPORT A LA DIRECTIVE 2018/2001

1. Positionnement par rapport aux articles de la Directive

L'article 29 est relatif aux critères de durabilité et de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour les biocarburants, les bioliquides et les combustibles issus de la biomasse. Il reprend les conditions dans lesquelles l'énergie produite à partir de biomasse peut contribuer :

- à l'objectif fixé par l'Union de veiller à ce que la part d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie de l'Union en 2030 soit d'au moins 32 % (article 3 paragraphe 1) ;
- aux parts d'énergie renouvelable devant être atteintes par les États membres.

Parmi ces conditions, il est mentionné que seules les installations produisant de l'électricité, de la chaleur et du froid dont la puissance thermique nominale totale est égale ou supérieur à 20 MW (dans le cas des combustibles issus de la biomasse solide) doivent remplir les critères de durabilité et de réduction des gaz à effet de serre. Néanmoins, les États membres peuvent appliquer les critères aux installations de puissance thermique nominale inférieure.

Les critères (paragraphes 2 à 7 et 10) repris à l'article 29 en lien avec notre étude sont repris dans le tableau ci-dessous :

	En lien avec notre étude	Contenu
Paragraphe 2	Non	-
Paragraphe 3	Non	-
Paragraphe 4	Non	-
Paragraphe 5	Non	-
Paragraphe 6	Oui	Critères établis en vue de réduire au minimum les risques d'utiliser de la biomasse forestière issue de production non durable et se rapportant au pays d'exploitation et à la législation en vigueur en termes de : • légalité des opérations de récolte ; • régénération effective de la forêt ; • protection des zones ; • exploitation assurée dans le suivi de la préservation de la qualité des sols et de la biodiversité ; • exploitation maintenant ou améliorant les capacité de production à long-terme.
Paragraphe 7	Oui	Critères se rapportant à l'utilisation des terres et changements d'affectation des terres et de la foresterie (UTCATF) tels que : • Faire partie de l'accord de Paris. • Présenter une contribution prévue déterminée au niveau national (CDN) à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. Cette contribution: ○ couvre les émissions et absorptions de CO_2 de l'agriculture, de la sylviculture et de l'utilisation des sols, ○ garantit que les modifications apportées au stock de carbone associé à la récolte de biomasse sont prises en compte aux fins de l'engagement du pays de réduire ou de limiter les émissions de GES. • Disposer d'une législation (nationale ou infra nationale) : ○ applicable à la zone d'exploitation et en vue de conserver ou de renforcer les stocks et les puits de carbone, ○ attestant que les émissions du secteur UTCATF déclarées ne dépassent pas les absorptions.
Paragraphe 10	Oui	La réduction des émissions de GES résultant de l'utilisation de combustibles issus de la biomasse est d'au minimum : • 70 % pour la production d'électricité, de chaleur et de froid dans des installations mises en service du 01/01/2021 au 31/12/2025 ; • 80 % pour la production d'électricité, de chaleur et de froid dans des installations mises en service à partir du 01/01/2026.

L'article 31 précise comment calculer l'impact des combustibles issus de la biomasse sur les GES aux fins de l'article 29 et l'annexe VI se rapporte aux combustibles de la biomasse.

Les émissions de gaz à effet de serre sont calculées sur base de la formule suivante (paragraphe 1) :

- Avant la conversion

a) Les émissions de gaz à effet de serre résultant de la production et de l'utilisation de combustibles issus de la biomasse avant la conversion en électricité, chauffage et refroidissement sont calculées selon la formule suivante:

$$E = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr}$$

sachant que:

E	=	le total des émissions résultant de la production du combustible avant la conversion de l'énergie,
e_{ec}	=	les émissions résultant de l'extraction ou de la culture des matières premières,
e_l	=	les émissions annualisées résultant de modifications des stocks de carbone dues à des changements dans l'affectation des sols,
e_p	=	les émissions résultant de la transformation,
e_{td}	=	les émissions résultant du transport et de la distribution,
e_u	=	les émissions résultant du carburant utilisé,
e_{sca}	=	les réductions des émissions dues à l'accumulation du carbone dans les sols grâce à une meilleure gestion agricole,
e_{ccs}	=	les réductions des émissions dues au piégeage et au stockage géologique du CO_2, et
eccr	=	les réductions des émissions dues au piégeage et à la substitution du CO_2.

Notre approche diverge de la Directive étant donné que les émissions de GES liées à la consommation énergétique des chaudières, à la construction des chaufferies et à la gestion des cendres sont prises en compte dans l'étude.

- Comme résultante de l'utilisation pour la production de chaleur, de froid et d'électricité
  - Pour les installations ne fournissant que de la chaleur (point i)

$$EC_h = \frac{E}{\eta_h}$$

  - Pour la chaleur utile provenant d'installations énergétiques fournissant de la chaleur en même temps que de l'électricité (point iv)

    Lorsque le chauffage est co-généré avec de l'électricité, les émissions sont réparties entre la chaleur et l'électricité sur base de la formule reprise ci-dessous.

$$EC_h = \frac{E}{\eta_h}\left(\frac{C_h \cdot \eta_h}{C_{el} \cdot \eta_{el} + C_h \cdot \eta_h}\right)$$

Sachant que :

E	=	le total des émissions de gaz à effet de serre du combustible avant la conversion finale,
η_{el}	=	le rendement électrique, défini comme la production annuelle d'électricité divisée par l'apport annuel d'énergie, sur la base de son contenu énergétique,
η_h	=	le rendement thermique, défini comme la production annuelle de chaleur utile divisée par l'apport annuel d'énergie sur la base de son contenu énergétique,
C_{el}	=	la fraction de l'exergie dans l'électricité, et/ou l'énergie mécanique, fixée à 100 % (C_{el} = 1),
C_h	=	le rendement de Carnot (fraction de l'exergie dans la chaleur utile).

Le rendement de Carnot (C_h) pour la chaleur utile à différentes températures est défini selon la formule suivante:

$$C_h = \frac{T_h - T_0}{T_h}$$

sachant que:

T_h = la température, mesurée en température absolue (kelvin) de la chaleur utile au point de fourniture,

T_0 = la température ambiante, fixée à 273,15 kelvins (soit 0 °C).

Notre approche diverge de la Directive en cas de base étant donné que nous réalisons un élargissement des frontières du système mais est cohérente lors de l'analyse de sensibilité où une affectation au contenu énergétique est réalisée.

Les émissions résultant de l'extraction, de la récolte ou de la culture des matières premières (e_{ec}) (paragraphe 5) :

- comprennent :
  - le procédé d'extraction ou de culture lui-même,
  - la collecte,
  - le séchage et le stockage des matières premières,
  - les déchets et les pertes,
  - la production de substances chimiques ou de produits nécessaires aux activités ;
- ne prennent pas en compte :
  - le piégeage du CO_2 lors de la culture de la matière première.

Notre approche diverge de la Directive sur ce point précis étant donné que le CO_2 capté lors de la croissance de la biomasse forestière est pris en compte. La directive ne prend en compte ni le captage ni l'émission. Notre approche prend en compte le captage et l'émission donnant un bilan biogénique (captations-émissions) égal à zéro.

Les émissions résultant de modifications des stocks de carbone dues à des changements dans l'affectation des sols (e_l) sont calculées sur base de la formule suivante (paragraphe 7) :

$$e_l = (CS_R - CS_A) \times 3{,}664 \times 1/20 \times 1/P - e_B \text{ (2)}$$

sachant que:

e_l = les émissions annualisées de gaz à effet de serre résultant de modifications des stocks de carbone dues à des changements dans l'affectation des sols [exprimées en masse d'équivalent CO_2 par unité d'énergie produite par des combustibles issus de la biomasse]. Les «terres cultivées» (3) et les «cultures pérennes» (4) sont considérées comme une seule affectation des sols,

CS_R = le stock de carbone par unité de surface associé à l'affectation des sols de référence [exprimé en masse (en tonnes) de carbone par unité de surface, y compris le sol et la végétation]. L'affectation des sols de référence est l'affectation des sols en janvier 2008 ou vingt ans avant l'obtention des matières premières, si cette date est postérieure,

CS_A = le stock de carbone par unité de surface associé à l'affectation des sols réelle [exprimé en masse (en tonnes) de carbone par unité de surface, y compris le sol et la végétation]. Dans les cas où le carbone s'accumule pendant plus d'un an, la valeur attribuée à CS_A est le stock estimé par unité de surface au bout de vingt ans ou lorsque les cultures arrivent à maturité, si cette date est antérieure,

P = la productivité des cultures (mesurée en quantité d'énergie produite par des combustibles issus de la biomasse par unité de surface par an), et

e_B = le bonus de 29 gCO_2eq/MJ de combustibles issus de la biomasse si la biomasse est obtenue à partir de terres dégradées restaurées dans les conditions établies au point 8.

Ce point est seulement abordé de manière exploratoire dans la partie 3.

Les émissions résultant de la transformation (e_p) comprennent les émissions dues (paragraphe 11) :

- au procédé de transformation lui-même ;
- aux déchets et pertes ;
- à la production de substances chimiques ou de produits utiles à la transformation y compris les émissions CO_2 correspondant à la teneur en carbone des apports fossiles.

Pour la comptabilisation de la consommation d'électricité, l'intensité des émissions de GES imputable à la production et à la distribution de cette électricité est présumée égale à l'intensité moyennes des émissions imputables à la production et à la distribution d'électricité dans une région donnée

Les émissions résultant du transport et de la distribution (e_{td}) comprennent les émissions dues (paragraphe 12) :

- au transport des matières premières et des matériaux semi-finis ;
- au stockage et à la distribution des produits finis.

Les émissions de CO_2 résultant du combustible utilisé (e_u) sont considérées comme nulles pour les combustibles issues de la biomasse (paragraphe 13). Seuls sont considérés dans la directive les émissions de CH_4 et N_2O.

À noter que dans notre approche, les émissions de CO_2 biogéniques sont prises en compte mais compensées par la captation. Le bilan biogénique (captations - émissions) est égal à zéro.

À noter que dans notre approche, les Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) divergent de ceux mentionnés dans la Directive.

Les PRG utilisés dans le cadre de cette étude sont ceux repris dans les recommandations de la Commission européenne pour l'évaluation environnementale des produits (cf. paragraphe 2.4 page 34) afin de répondre aux objectifs de l'étude qui souhaitait pouvoir caractériser la part des émissions/captations de C d'origine biogénique.

PRG Directive (kg CO_2 eq./kg)		PRG présente étude (kg CO_2 eq./kg)	
CO_2 biogénique	0	CO_2 biogénique	1
CO_2 fossile	1	CO_2 fossile	1
CH_4	25	CH_4	36,75
N_2O	298	N_2O	298

Par ailleurs, notre approche diverge de la Directive pour les 2 points suivants :

- *<u>Approche retenue dans la Directive :</u> Les émissions résultant de la fabrication des machines et des équipements ne sont pas prises en compte (paragraphe 1).*

La fabrication des installations est prise en compte dans notre approche (cf. tableaux repris au paragraphe 2.3 page 28 et suivantes). La production et la maintenance des engins d'exploitation forestiers sont exclus du processus dans notre approche.

- *<u>Approche retenue dans la Directive</u> : Les déchets et résidus, y compris les cimes et les branches d'arbres, et les résidus de transformation, sont considérés comme des matériaux ne dégageant aucune émission de gaz à effet de serre au cours du cycle de vie jusqu'à leur collecte, indépendamment du fait qu'ils soient transformés en produits intermédiaires avant d'être transformés en produits finis (paragraphe 18).*

Dans l'étude, via la variante du scénario 2 étudiant la récolte des menus bois et souches, comme dans la directive, il est considéré que ces matériaux ne dégagent aucune émission de gaz à effet de serre au cours du cycle de vie jusqu'à leur collecte. Cependant, pour le scénario granulé issu des produits connexes de transformation du bois, une analyse de sensibilité a été réalisée en leur allouant une partie des émissions de la sylviculture.

Les réductions d'émissions de gaz à effet de serre résultant de la production de chaleur, de froid et d'électricité à partir de combustibles issus de la biomasse sont calculées comme suit (paragraphe 3) dans les travaux préparatoires à la Directive :

$$\text{RÉDUCTION} = (EC_{F(h\&c,el)} - EC_{B(h\&c,el)})/EC_{F\,(h\&c,el)}$$

sachant que:

$EC_{B(h\&c,el)}$ = le total des émissions provenant de la chaleur ou de l'électricité,

$EC_{F(h\&c,el)}$ = le total des émissions provenant du combustible fossile de référence pour la chaleur utile et l'électricité.

- *Approche retenue dans la Directive et ses travaux préparatoires* : Pour les combustibles issus de la biomasse intervenant dans la production d'électricité, la valeur pour le combustible fossile de référence $EC_{F(el)}$ est 183 gCO_2eq/MJ d'électricité.

  Comme mentionné dans le rapport « Commission Staff Working Document, State of play on the sustainability of solid and gaseous biomass used for electricity, heating and cooling in the EU », cette valeur se rapporte à la production d'électricité à partir de :
  - 50 % gaz naturel (différentes sources de gaz étant considérées courtes et longues distances et aussi GNL) (turbine à gaz à cycle combiné) ;
  - 25 % de charbon dans des installations de gazéification intégrée à des centrales à charbon à cycle combiné (IGCC) ;
  - 25 % de charbon conventionnel.

  Il n'est par contre pas mentionné si cette valeur se rapporte à une fourniture d'électricité basse tension ou haute tension.

  Notre approche diverge de ces valeurs par défaut proposées dans la Directive afin d'être représentatif du contexte français (mix électrique). La valeur est plus faible étant donné la part élevée d'énergie d'origine nucléaire dans le mix français.

- *Approche retenue dans la Directive et ses travaux préparatoires* : Pour les combustibles issus de la biomasse intervenant dans la production de chaleur utile, ainsi que de chaleur et/ou de froid, la valeur pour le combustible fossile de référence $EC_{F(h)}$ est 80 gCO_2eq/MJ de chaleur (soit 288 g CO_2eq/kWh de chaleur soit 288 kg CO_2eq/MWh de chaleur).

  Comme mentionné dans le rapport « Commission Staff Working Document, State of play on the sustainability of solid and gaseous biomass used for electricity, heating and cooling in the EU », cette valeur se rapporte à la production de chaleur à partir de gaz naturel.

  Notre approche diverge de ces valeurs par défaut proposées dans la Directive étant donné la variabilité considérée sur les fuites de méthane et le rendement.

Extraits des valeurs par défaut détaillées pour les combustibles issus de la biomasse

Plaquettes forestières issues de menus bois – Valeurs de la Directive

Système de production de combustibles issus de la biomasse	Distance de transport	Émissions de gaz à effet de serre — valeurs par défaut (gCO_2eq/MJ)			
		Cultures	Transformation	Transports	Émissions hors CO_2 résultant du combustible utilisé
Plaquettes forestières provenant de rémanents d'exploitation forestière	1 à 500 km	0,0	1,9	3,6	0,5
	500 à 2 500 km	0,0	1,9	6,2	0,5
	2 500 à 10 000 km	0,0	1,9	12,6	0,5
	Plus de 10 000 km	0,0	1,9	24,6	0,5
Plaquettes forestières provenant de taillis à courte rotation (eucalyptus)	2 500 à 10 000 km	4,4	0,0	13,2	0,5

À noter que l'eucalyptus est considéré en cas de base dans la Directive comme provenant de forêts tropicales.

Plaquettes forestières issues de menus bois – Valeurs de la présente étude

Ce scénario se rapproche du scénario 1 auquel on aurait appliqué une combinaison entre la variante C et D pour l'itinéraire de gestion sylvicole.

	Distance de transport	Émissions de GES avec hypothèse neutralité carbone des émissions CO_2 de combustion du bois				
		Unité	Cultures	Transformation	Transport	Chaufferie (consommation + cendres)
Plaquettes forestières (Menus bois feuillus - résineux)	75 km (40+35)	kg CO_2 eq/MWh_{th}	2,1-4,6	2,9-4,5	1,1-3,3	4,0-4,8
		g CO_2 eq/MJ	0,59-1,3	0,82-1,3	0,31-0,91	1,1-1,3

Plaquettes forestières issues de rondins – Valeurs de la Directive

Système de production de combustibles issus de la biomasse	Distance de transport	Émissions de gaz à effet de serre — valeurs par défaut (gCO_2eq/MJ)			
		Cultures	Transformation	Transports	Émissions hors CO_2 résultant du combustible utilisé
Plaquettes forestières issues de billons	1 à 500 km	1,1	0,4	3,6	0,5
	500 à 2 500 km	1,1	0,4	6,2	0,5
	2 500 à 10 000 km	1,1	0,4	12,6	0,5
	Plus de 10 000 km	1,1	0,4	24,6	0,5

Plaquettes forestières issues de rondins – Valeurs de la présente étude

	Distance de transport	Émissions de GES avec hypothèse neutralité carbone des émissions CO2 de combustion du bois				
		Unité	Cultures	Transformation	Transport	Chaufferie (consommation + cendres)
Plaquettes forestières (issues de taillis de châtaigner)	75 km (40+35)	kg CO_2 eq/MWh_{th}	4,6	4,5	3,3	4,0
		g CO_2 eq/MJ	1,3	1,3	0,91	1,1

Connexes - Valeurs de la Directive

Système de production de combustibles issus de la biomasse	Distance de transport	Émissions de gaz à effet de serre — valeurs par défaut (gCO_2eq/MJ)			
		Cultures	Transformation	Transports	Émissions hors CO_2 résultant du combustible utilisé
Produits connexes des industries de transformation du bois	1 à 500 km	0,0	0,4	3,6	0,5
	500 à 2 500 km	0,0	0,4	6,2	0,5
	2 500 à 10 000 km	0,0	0,4	12,6	0,5
	Plus de 10 000 km	0,0	0,4	24,6	0,5

Connexes - Valeurs de la présente étude

	Distance de transport	Émissions de GES avec hypothèse neutralité carbone des émissions CO_2 de combustion du bois				
		Unité	Cultures	Transformation	Transport	Chaufferie (consommation + cendres)
Connexes	0 km	kg CO_2 eq/MWh_{th}	0*	0**	0 (utilisation directement sur site)	14,9***
		g CO_2 eq/MJ	0*	0**	0	4,15***

*Non-affectation en cas de base d'une part des impacts liés à la gestion sylvicole

**Non-affectation en cas de base des impacts liés à la scierie

*** Un traitement SNCR est considéré

Granulés – Valeurs de la Directive

Système de production de combustibles issus de la biomasse	Distance de transport	Émissions de gaz à effet de serre — valeurs par défaut (gCO_2eq/MJ)			
		Cultures	Transformation	Transport & distribution	Émissions hors CO_2 résultant du combustible utilisé
Briquettes ou granulés de produits connexes des industries de transformation du bois (cas 1)	1 à 500 km	0,0	17,2	3,3	0,3
	500 à 2 500 km	0,0	17,2	3,2	0,3
	2 500 à 10 000 km	0,0	17,2	5,0	0,3
	Plus de 10 000 km	0,0	17,2	9,2	0,3

Granulés – Valeurs de la présente étude

- Le cas 1 se rapporte aux procédés dans lesquels une chaudière au gaz naturel est utilisée pour fournir la chaleur industrielle à la presse à granulés. L'électricité industrielle est acquise auprès du réseau.

Nous étudions ce cas en analyse de sensibilité (cf. paragraphe 4.1.3 page 66).

	Distance de transport	Émissions de GES avec hypothèse neutralité carbone des émissions CO_2 de combustion du bois				
		Unité	Cultures	Transformation	Transport	Chaufferie (consommation + cendres)
Granulés	175 km	kg CO_2 eq/MWh_{th}	0*	28	3,4	2.42
		g CO_2 eq/MJ	0*	7,78	0,94	0,67

*Non-affectation en cas de base d'une part des impacts liés à la gestion sylvicole

Granulés – Valeurs de la Directive

Système de production de combustibles issus de la biomasse	Distance de transport	Émissions de gaz à effet de serre — valeurs par défaut (gCO_2eq/MJ)			
		Cultures	Transformation	Transport & distribution	Émissions hors CO_2 résultant du combustible utilisé
Briquettes ou granulés de bois provenant de produits connexes des industries de transformation du bois (cas 2a)	1 à 500 km	0,0	7,2	3,4	0,3
	500 à 2 500 km	0,0	7,2	3,3	0,3
	2 500 à 10 000 km	0,0	7,2	5,1	0,3
	Plus de 10 000 km	0,0	7,2	9,3	0,3
Briquettes ou granulés de produits connexes des industries de transformation du bois (cas 3a)	1 à 500 km	0,0	0,3	3,4	0,3
	500 à 2 500 km	0,0	0,3	3,3	0,3
	2 500 à 10 000 km	0,0	0,3	5,1	0,3
	Plus de 10 000 km	0,0	0,3	9,3	0,3

Granulés – Valeurs de la présente étude

- Le cas 2a se rapporte aux procédés dans lesquels une chaudière alimentée par du bois déchiqueté est utilisée pour fournir la chaleur industrielle à la presse à granulés, qui est alimentée en électricité par le réseau. L'électricité industrielle est acquise auprès du réseau.

	Distance de transport	Émissions de GES avec hypothèse neutralité carbone des émissions CO_2 de combustion du bois				
		Unité	Cultures	Transformation	Transport	Chaufferie (consommation + cendres)
Granulés	175 km	kg CO_2 eq/MWh_{th}	0*	5,4	3,4	2,42
		g CO_2 eq/MJ	0*	1,51	0,94	0,67

*Non-affectation en cas de base d'une part des impacts liés à la gestion sylvicole

- Le cas 3a se rapporte à des procédés dans lesquels une centrale de cogénération, alimentée par du bois déchiqueté, est utilisée pour fournir électricité et chaleur à la presse à granulés, qui est alimentée en électricité par le réseau.

Nous étudions un cas relativement similaire en analyse de sensibilité.

	Distance de transport	Émissions de GES avec hypothèse neutralité carbone des émissions CO_2 de combustion du bois				
		Unité	Cultures	Transformation	Transport	Chaufferie (consommation + cendres)
Granulés	175 km	kg CO_2 eq/MWh_{th}	0*	3.7	3,4	2,42
		g CO_2 eq/MJ	0*	1,03	0,94	0,67

*Non-affectation en cas de base d'une part des impacts liés à la gestion sylvicole

2. Positionnement par rapport aux travaux préparatoires

L'ensemble des paragraphes qui suivent se base sur le rapport « Solid and gaseous bioenergy pathways : input values and GHG emissions – Calculated according to the methodology set in COM(2010)11 and SWD(2014)259 – J. Giuntoli, A. Agostini, R. Edwards, L. Marelli (2014) » – Report EUR 26696 EN. Ce document a servi de base pour l'élaboration du contenu de la Directive.

2.1. Valeurs par défaut pour la production d'électricité

La valeur proposée ci-dessous se rapporte :

- à une même répartition entre modes de production de l'électricité ;
- a priori, à un niveau de tension différent à savoir la haute tension.

La conversion de haute tension vers basse tension peut se faire en prenant en compte les pertes lors de la transmission.

Table 1: Mix of sources and conversion pathways chosen to represent a marginal electricity mix and emission factor at power plant outlet to the high-voltage grid (380 kV, 220 kV, 110 kV) (as proposed by EC in SWD(2014) 259)

Pathway (JEC)	Electricity production	Unit	Amount	Comment
KOEL1	Conventional hard coal	$gCO_{2\,eq}/MJ_{el}$	**261.5**	43.5% el efficiency
KOEL2	Coal (IGCC)	$gCO_{2\,eq}/MJ_{el}$	**234.6**	48% el efficiency
GBEL1b	Natural gas (CCGT)	$gCO_{2\,eq}/MJ_{el}$	**118.2**	58.1% el efficiency, 4000 km pipe transport of natural gas
GBEL1a	Natural gas (CCGT)	$gCO_{2\,eq}/MJ_{el}$	**129.4**	58.1% el efficiency,7000 km pipe transport of natural gas
GREL1	Natural gas (CCGT)	$gCO_{2\,eq}/MJ_{el}$	**126.5**	58.1% el efficiency, LNG
Emissions				
Average	(25/25/16.7/16.7/16.7%)	$gCO_{2\,eq}/MJ_{el}$	**186.4**	
CO_2	Output	g/MJ	**169.4**	
CH_4	Output	g/MJ	**0.61**	
N_2O	Output	g/MJ	**0.006**	

Comments:

- The average mix considered consists of: 25% KOEL 1, 25% KOEL 2, 16.7% GBEL1a, 16.7% GBEL1b, 16.7% GREL1.

Table 2 Electricity transmission losses in the high-voltage grid (380 kV, 220 kV, 110 kV)

	I/O	Unit	Amount	Source
Electricity	Input	MJ/MJ_e	**1.015**	1
Electricity (HV)	Output	MJ	**1.0000**	

Table 3 Electricity distribution in the medium-voltage grid (10 – 20 kV)

	I/O	Unit	Amount	Source
Electricity (HV)	Input	MJ_e/MJ_e	**1.038**	2
Electricity (MV)	Output	MJ	**1.0000**	

Table 4 Electricity distribution losses to low voltage (380 V)

	I/O	Unit	Amount	Source
Electricity (MV)	Input	MJ/MJ_e	**1.064**	2
Electricity (LV)	Output	MJ	**1.0000**	

Comment

- The final GHG emission factor for electricity supplied to consumers at 380 V is equal to 209 $gCO_{2\,eq}/MJ_{el}$

Sources:

1. ENTSO-E, 2011;
2. AEEG, 2012;

Les différences entre la Directive et l'approche retenue dans le cadre de cette étude, résulte dans le fait que l'électricité consommé est considérée comme étant celle qui est produite en France (57 g CO_2 eq/kWh soit 15.8 g CO_2 eq/MJ) et présente en contenu carbone plus faible que celui pris en compte lors des travaux préparatoires à l'élaboration de la Directive.

2.2. Valeurs par défaut pour la production de plaquettes forestières provenant de rémanents d'exploitation forestière

Ce scénario se rapproche du scénario 1 auquel on aurait appliqué une combinaison entre la variante C et D pour l'itinéraire de gestion sylvicole.

Les différences entre la Directive et notre scénario sont présentées dans le tableau ci-dessous. Des valeurs plus représentatives de la situation française ont été considérées dans le cadre du scénario 1.

	Directive	Scénario 1
Devenir des souches	Récolte	Pas de récolte
Séchage naturel en bord de route avant broyage en bord de route	50 % à 30 % d'humidité	45 % à 25 % d'humidité
Pertes de matière anhydre lors du séchage naturel	5 %	13 %
Distance de transport considérée	200 à 500 km	40+35 km

2.3. Valeurs par défaut pour la production de plaquettes forestières issues de rondins

Ce scénario se rapproche du scénario 1 pour l'itinéraire de gestion sylvicole.

Les différences entre la Directive et notre scénario sont présentées dans le tableau ci-dessous. Des valeurs plus représentatives de la situation française ont été considérées dans le cadre du scénario 1.

	Directive	**Scénario 1**
Séchage naturel en bord de route avant broyage en bord de route	50 % à 30 % d'humidité	45 % à 25 % d'humidité
Pertes de matière anhydre lors du séchage naturel	5 %	13 %
Distance de transport considérée	200 à 500 km	40+35 km

2.4. Valeurs par défaut pour la production de produits connexes des industries de transformation du bois

Ce scénario se rapproche du scénario 3.

Les différences entre la Directive et notre scénario sont présentées dans le tableau ci-dessous. Des valeurs plus représentatives de la situation française ont été considérées dans le cadre du scénario 3.

	Directive	Scénario 3
Broyage	Exclu	Inclus - Broyage rapide
Distance de transport considérée	200 à 500 km	0 km

2.5. Valeurs par défaut pour la production de granulés de produits connexes des industries de transformation du bois

Ce scénario se rapproche du scénario 6 et de ses variantes :

- Le cas 1 se rapporte aux procédés dans lesquels une chaudière au gaz naturel est utilisée pour fournir la chaleur industrielle à la presse à granulés.

  Nous étudions ce cas en analyse de sensibilité.

- Le cas 2a se rapporte aux procédés dans lesquels une chaudière alimentée par du bois déchiqueté est utilisée pour fournir la chaleur industrielle à la presse à granulés, qui est alimentée en électricité par le réseau.

  Ce cas se rapproche du scénario 6 de base.

- Le cas 3a se rapporte à des procédés dans lesquels une centrale de cogénération, alimentée par du bois déchiqueté, est utilisée pour fournir électricité et chaleur à la presse à granulés, qui est alimentée en électricité par le réseau.

  Nous étudions un cas relativement similaire en analyse de sensibilité.

Les différences entre la Directive et notre scénario sont présentées dans le tableau ci-dessous. Des valeurs plus représentatives de la situation française ont été considérées dans le cadre du scénario 6.

	Directive	Scénario 6 et variantes
Transport des connexes	Inclus	Exclu
Distance parcourue par les granulés lorsqu'ils viennent d'hors Europe	2000-16500 km en bateau 200-500 km en camion 0 à 750 km en train	10500 km en bateau 775 km en camion 0 km en train
Consommation d'énergie lors de la production des granulés	**Table 67 UPDATED Process for the production of pellets from fresh woodchips** **Production of wood pellets & briquettes from fresh forest chips: moisture ~ 50 %, and final pellet moisture 10 %** **I/O** / **Unit** / **Amount** / **Source** Woodchips: Input, $MJ/MJ_{wood\ pellets}$, 1.01, 4 Electricity: Input, $MJ/MJ_{wood\ pellets}$, 0.050, 5 Heat: Input, $MJ/MJ_{wood\ pellets}$, 0.185, 1,2 Diesel: Input, $MJ/MJ_{wood\ pellets}$, 0.0020, 1,3	Cf. Tableau 52 page 67

3. Conclusions

Conclusion 20 : **Les situations étudiées dans le cadre de la Directive et des travaux préparatoires à celles-ci diffèrent fortement des cas étudiés dans le présent rapport.**

Les situations étudiées dans la présente étude se rapporte aux spécificités françaises et ne correspondent, dans la plupart de cas, pas aux situations ayant fait l'objet d'une étude dans les travaux préparatoires à la Directive de par :

- des différences en termes de méthodologie :
  - le mode de comptabilisation des émissions de CO_2 biogénique,
  - les PRG utilisés,
  - les frontières du système considérées ;
- des différences dans les données utilisées telles que :
  - les distances de transport,
  - le mix électrique considéré.

ANNEXES GÉNÉRALES

1. Annexe 1 : Membres du COTECH

ALEXANDRE Céline (RDC Environment)	FISCHER Clarisse (CIBE)
AUGEVEN-BOUR Isabelle (ADEME)	FLAJOLLET-MILLAN Johanna (SER)
BAILLY Alain (FCBA)	GRIMAULT Julia (I4CE)
BENOIST Anthony (CIRAD)	KHATIB Sarah (FNE)
BUITRAGO Miriam (ADEME)	LAURET Agnès (MAA)
CHABRILLAT Rémi (ADEME)	LE BOULER Hervé (FNE)
CHAPOULET Christophe (ONF Energie)	LEON Clarisse (UICN)
COLIN Antoine (IGN)	LHOTELLIER Johan (RDC Environment)
COUSIN Stéphane (Biomasse Normandie)	LOGEL Xavier (RDC Environment)
CROIZE-POURCELET Gilles (MTES)	LOUSTAU Denis (INRAE)
DE CAEVEL Bernard (RDC Environment)	MACHEFAUX Emilie (ADEME)
DE CHERISEY Hugues (SNPGB)	MARTEL Simon (CNPF)
DELEUZE Christine (ONF)	MOUSSET Jérôme (ADEME)
DEROUBAIX Gerard (FCBA)	OUDART Bénédicte (COPACEL)
DE SUTTER Baptiste (Union des Industries des panneaux de process)	PAGNAC FARBIAZ Elisabeth (MTES)
DUBILLY Anne-Laure (ADEME)	PEYRON Jean-Luc (GIP-Ecofor)
DUFOUR Anthony (Université Lorraine)	POSTEC Gwenaël (Consultant pour la FNB)
DUHALDE Michel (MTES)	TABET Karim (Dalkia, FEDENE)
DURAND Margaux (ADEME)	TRONQUET Clothilde (i4CE)
FEIX Isabelle (ADEME)	VIAL Estelle (FCBA)
	YON Thibault (FEDENE)

2. Annexe 2 : Questionnements listés au début de l'étude

La première étape de l'étude a consisté à lister l'ensemble des questionnements des parties prenantes de l'étude afin d'en définir le champ. Ces questionnements sont repris dans le tableau ci-dessous. Pour autant, ils n'ont pas tous été retenus.

	Questionnements	Étudié à travers un scénario	Étudié à travers une analyse de sensibilité	Extrapolation possible	L' étude NE pourra PAS y répondre	Comment l'étude prévoit de répondre à ce questionnement
	Quelles gestions sylvicoles faut-il favoriser ? (à niveau des variations de stocks de carbone dans les écosystèmes et des émissions fossiles liées à la sylviculture ? Quelle est l'importance des émissions fossiles de la sylviculture selon type de gestion (plantation/production de plante versus régénération naturelle ; fertilisation) ?	X				Différents scénarios de gestion des forêts sont étudiés dans le cadre du lot 2 par rapport un scénario de référence contrefactuel. Les émissions fossiles pour la gestion sylvicole seront modélisées via le lot 1 de l'étude
	Quelle est l'importance potentielle des impacts GES d'origine biogénique par rapport aux émissions fossiles ?	X				L'étude pourra présenter les résultats avec et sans la prise en compte du carbone biogénique. Les plaquettes paysagères et bocagères ne feront pas l'objet d'un scénario dans l'étude (l'étude n'évaluera pas les variations de stock de carbone dans les systèmes agroforestiers) mais pourront faire l'objet d'une conclusion par extrapolation des résultats concernant les autres étapes du cycle de vie.
	Le type de matière entrante (rondins, houppiers entiers, arbres entiers de faible diamètre comprenant des menus bois et souches) influence-t-il le bilan environnemental et de quelle manière ?		X	X		Un scénario de base analysera l'impact de la filière avec les plaquettes forestières à partir de rondins et l'influence des autres matières d'origine forestière (rondins, arbres entiers de faible diamètre comprenant des menus bois et souches) sera analysé en sensibilité ou par extrapolation (les paramètres différenciants seront déterminés pendant la collecte de données).
	Quel mode de préparation du bois présente le meilleur profil environnemental ?		X			Les scénarios se concentreront sur l'étude de plaquettes forestières calibrées sèches et de plaquettes forestières humides (broyées en forêt et directement envoyées vers la chaufferie). L'impact des étapes supplémentaires comme le criblage pourra être étudié en analyse de sensibilité.
	Quelle est l'influence des différents modes de transport et de la distance ? (transport par bateau vs. transport par camion, distance de 50 km vs. utilisation des connexes directement sur site) ?		X			L'influence des différents modes de transport sera testée en analyse de sensibilité en évaluant l'influence : • des distances • du mode de transport (impact maritime ou fluvial)
	Dans quelles conditions la production de granulés apporte-t-elle une plus-value environnementale ?	X				La production et la combustion du granulé fait l'objet d'un scénario à part entière. Des étapes supplémentaires pourront être étudiées comme la torréfaction et la *steam explosion* (black pellet).
	Quel est l'impact de la production d'énergie à partir de connexes de l'industrie ?	X				L'utilisation des connexes de l'industrie directement sur le site fait l'objet d'un scénario à part entière.
	Quel est l'impact de la production d'énergie à partir de déchets verts et refus de criblage de compost ?			X		Les déchets verts et refus de criblage de compost ne feront pas l'objet d'un scénario dans l'étude mais pourront faire l'objet d'une conclusion par extrapolation des résultats.
	Quel est l'impact de la production d'énergie à partir de déchets de bois « propre » ?	X				La production de chaleur à partir de déchets bois « propre » fait l'objet d'un scénario à part entière (installation 2910 A)
	Quel est l'impact de la production d'énergie à partir de déchets de bois « adjuvanté » ?	X				La production de chaleur à partir de déchets de bois « adjuvanté » (ameublement) fera l'objet d'un scénario. La particularité de ce scénario est qu'il y a déjà une étude en cours sur le sujet (par Eco-mobilier).
	Vers quelle filière est-il préférable d'orienter les connexes de l'industrie ?			X		L'étude ne pourra pas donner de préconisations sur l'utilisation des connexes de scierie. Néanmoins une analyse de sensibilité est envisagée sur un scénario afin d'ouvrir le sujet des effets de substitution entre les différentes destinations possibles du bois : étude de sensibilité pour prendre en compte l'évitement d'un traitement fatal comme l'enfouissement. *Remarque : la compétition entre différents usages de bois, par exemple entre l'industrie du bois énergie et l'industrie des panneaux de particules nécessite de connaitre et modéliser les mécanismes sur le marché : (un des questionnements possibles : par quoi le panneau peut être*

	Questionnements	Étudié à travers un scénario	Étudié à travers une analyse de sensibilité	Extrapolation possible	L' étude NE pourra PAS y répondre	Comment l'étude prévoit de répondre à ce questionnement
						substitué si le flux de bois est utilisé pour produire de l'énergie ?). Ceci reviendrait à modéliser des scénarios conséquentiels, ce qui n'est pas prévu dans le cadre de cette étude. L'un des scénarios du lot 2 envisage également d'étudier l'utilisation de bois d'éclaircie en énergie plutôt qu'en panneau.
	Quelle filière de traitement du bois en fin de vie présente le meilleur profil environnemental ?				X	L'étude ne pourra pas donner de préconisations sur le meilleur traitement des déchets bois. L'analyse se sensibilité citée dans la ligne précédente sur le détournement du flux de l'enfouissement vers la filière bois énergie est une ouverture sur le sujet.
	En fonction de l'usage final, les étapes de préparation du combustible ont-elles une influence sur le bilan environnemental ?	X				3 scénarios différents sont étudiés en cas de base. Un scénario par usage (chauffage urbain, process industriel et cogénération)
	Quelle est l'influence des différentes technologies de traitement des fumées et foyers ?		X			L'influence de la présence ou absence de certains équipements dans les chaufferies sera étudiée en analyse de sensibilité. Notamment : • filtration des poussières • système de de DeNOx • lavage de fumées • condenseurs • accumulateurs de chaleur sur petites chaufferies
	Quel est l'impact environnemental de la production de chaleur à partir de nouvelles technologies comme la pyro-gazéification ?				X	L'étude n'a pas pour objectif d'étudier les technologies innovantes.
	Quelle gestion des cendres est à privilégier ?		X			La gestion des cendres pourra être étudiée dans une analyse de sensibilité. L'enfouissement pourra être comparé à l'épandage.
	Dans quelles conditions la production d'énergie à partir de biomasse présente-t-elle une plus-value environnementale par rapport à l'énergie issue d'énergie fossile ?	X				Un scénario comparatif sera effectué dans le rapport. Une attention particulière sera portée au périmètre de comparaison pour qu'il n'y ait pas de biais dans la comparaison du fait des pertes non incluses dans l'étude (par exemple, une comparaison est possible entre la production de chaleur à partir de gaz naturel chez l'industriel et la production de chaleur bois à des fins industrielles)
	Quel est l'impact du développement de la production de chaleur à partir de la biomasse sur le mix énergétique français ?				X	L'étude n'a pas pour objectif d'évaluer l'impact du développement de chaufferie biomasse sur le mix énergétique français.
	Quel est l'impact environnemental de la politique de production de chaleur/ production conjointe de chaleur et d'électricité à partir de bois, par rapport à l'utilisation d'énergie fossile au niveau **de la France ?**				X	Aucun modèle économique ne sera utilisé dans l'étude pour évaluer l'impact du développement accru de la filière bois énergie sur d'autres filières. L'étude analysera cependant l'éventuel impact des prélèvements accrus de bois sur le niveau de séquestration de carbone en forêt (au niveau de la parcelle et au niveau de la France→ Cf. scénarios du lot 2 et chapitre sur l'intégration du lot 2 dans le lot 1 en fin de document). L'ADEME envisage de traiter l'intégration des modèles économiques, après avoir avancé sur ces premiers travaux préfigurateurs.

ANNEXES RELATIVES A LA PARTIE 1

3. Annexe 3 : Composition du bois

La composition chimique du bois est supposée similaire pour les différentes essences de bois étudiées (feuillus, résineux). Celle-ci est décrite dans le tableau suivant.

Tableau 114 : Composition chimique du bois (source : Biomasse Normandie)

Élément chimique	Caractéristiques moyennes du bois
C	49,64 %
H	6,0 %
O	44 %
N	0,35 %
S	0,01 %

4. Annexe 4 : PCI du combustible

Tableau 115 : PCI du combustible (source : Biomasse Normandie)

Humidité	PCI (MWh/t MB) pour un taux de cendres de 1 %	
	Résineux	Feuillus
0%	5,330	5,068
5%	5,028	4,780
10%	4,727	4,492
15%	4,426	4,204
20%	4,124	3,915
25%	3,823	3,627
30%	3,522	3,339
35%	3,220	3,051
40%	2,919	2,762
45%	2,618	2,474
50%	2,316	2,186
55%	2,015	1,898
60%	1,714	1,609
65%	1,412	1,321
70%	1,111	1,033
75%	0,810	0,745
80%	0,509	0,456
85%	0,207	0,168

y = a*x + b

a	-6,0264	-5,765
b	5,3296	5,0683

5. Annexe 5 : Modélisation du transport

Camion

Les impacts environnementaux du transport par camion comprennent :

- les émissions liées à la production et à l'approvisionnement de carburant ;
- les émissions directes lors de la combustion du carburant ;
- les infrastructures.

Consommation de carburant et émissions directes

La consommation de carburant et les émissions dans l'air sont déterminées avec la méthodologie COPERT 4[153] (version 10.0), un outil de calcul des émissions polluantes imputables au transport routier. Il permet d'estimer les émissions des polluants majeurs (CO, NO_x, VOC, PM, NH_3, SO_2, métaux lourds) produits par les différentes catégories de véhicules (de la voiture au semi-remorque) ainsi que les émissions de gaz à effet de serre (CO_2, N_2O, CH_4).

COPERT 4 donne la consommation du camion chargé à 100%. Pour calculer la consommation réelle, on considère que deux tiers est fixe et qu'un tiers est fonction de la masse effectivement transportée par le camion.

L'inventaire de référence utilisé pour le camion est « Heavy Duty Trucks Articulated 34 - 40 t – Diesel ».

Le procédé Ecoinvent utilisé pour la consommation de carburant est le suivant : « market for diesel, EcoInvent 3.4»

Les normes d'émissions respectées par la flotte de camions modélisés sont réparties selon les règles suivantes :

- 11 % EURO 3 ;
- 19 % EURO 4 ;
- 28 % EURO 5 ;
- 43 % EURO 6.

La méthode COPERT 4 établit des consommations de diesel par kilomètre parcouru en fonction des voies empruntées. Une différenciation est également faite sur le lieu d'émission (densité de population faible pour les zones rurales et voies rapides et densité forte pour les zones urbaines)

Les voies empruntées par défaut par les camions modélisés sont à :

- 5 % en zone urbaine ;
- 15 % en zone rurale ;
- 80 % en voie rapide[154].

Infrastructures

L'inventaire de cycle de vie des infrastructures est défini pour un camion moyen et est exprimé en v.km (véhicule x kilomètres). L'ICV est basé sur le rapport n°14 d'Ecoinvent – Transport.

Les infrastructures incluses sont la production du camion, son entretien et sa fin de vie ainsi que la fabrication des routes, l'entretien et la fin de vie.

Bateau

Le transport en bateau est modélisé par un transport transocéanique (ICV : market for transport, freight, sea, transoceanic ship, GLO, Ecoinvent v3.5).

Note : La consommation de fuel du bateau est supposée être indépendante du taux de chargement (les bateaux remplissent leurs cales avec de l'eau lorsqu'elles sont vides.

Le taux de retour à vide est estimé entre 30 et 50 % (la valeur médiane dans le scénario de base est de 40 %).

[153] Destinée à être utilisée à l'échelle européenne et financée par *l'European Environment Agency* (EEA), cette méthodologie a été mise au point par Leonidas Ntziachristios et Zissis Samaras (*Laboratory of Applied Thermodynamics, Atristotle University of Thessaloniki*, Grèce). Copert 4 fait partie du projet ARTEMIS qui a fédéré 36 organisations (entreprises, instituts de recherche, universités) de 15 pays européens dans le but d'harmoniser les facteurs d'émissions utilisés dans les différents pays d'Europe.

[154] Hypothèse RDC Environment

Train

Le transport en train décrit ici peut avoir lieu pour les transports suivants :

- approvisionnement ;
- transport.

Les impacts environnementaux du train comprennent :

- les émissions directes ;
- les émissions liées à la production et à la fourniture de carburant ou à la production d'électricité ;
- les infrastructures.

Consommation d'électricité et de diesel

Les consommations d'électricité et de diesel sont calculées en fonction de la "tonne brute.km". Cela permet de modéliser un taux de retour à vide (TRE) spécifique.

Les valeurs des consommations énergétiques utilisées à cette fin ont été calculées sur la base des données fournies par Ecotransit.

Les valeurs de tonnes brutes sont indépendantes du nombre de wagons par train mais dépendent de la tare du wagon (fixée à 23 tonnes) et du chargement effectif d'un wagon. La charge utile maximale est fixée à 61 tonnes (source : Ecotransit).

La charge utile dépend du type de marchandises transportées (source : Ecotransit) :

Densité des marchandises	Charge utile effective	Taux de retour à vide
Marchandises lourdes (en vrac)	100 %	80 %
Marchandises moyennes	60 %	50 %
Marchandises légères	30 %	20 %

Pour les retours à vide, le poids brut est la tare du wagon.

Émissions directes

Pour les trains diesel, les émissions directes résultant de la combustion du diesel sont les polluants suivants : CO_2, N_2O, CH_4, NO_X, SO_2, $PM_{2,5}$, NMVOC, Hydrocarbures aromatiques.

Pour les trains électriques, les émissions résultant de la production d'électricité sont déterminées par le mix électrique.

Infrastructures

Un ICV agrégé pour l'infrastructure est calculé pour un train moyen et exprimé en tonnes brutes * km (Gtkm). Le même type d'approche que pour le camion est suivi, basé sur Ecoinvent LCI "transport, fret, rail, RER, [tkm]" et le rapport n°14 - Transport. L'ICV Ecoinvent est exprimé en tkm (net) tandis que les impacts du transport par train sont modélisés par Gtkm. La valeur de 2,4 est utilisée comme coefficient entre les tonnes brutes et les marchandises transportées.

6. Annexe 6 : Composition des cendres sous foyer et sous multi-cyclone

Polluant	Cendres sous foyer			Cendres sous multicyclone		
	Composition par gamme de puissance des chaufferies			Composition par gamme de puissance des chaufferies		
	0 à 0,5 MW	0,5 à 5 MW	5 à 50 MW	0 à 0,5 MW	0,5 à 5 MW	5 à 50 MW
Scénarios	S1, S6	S2, S4	S3, S7, S8, S9	S1, S6	S2, S4	S3, S7, S8, S9
CaO (kg/t)	498,40	704,67	413,70	424,67	596,40	423,50
MgO (kg/t)	45,05	35,29	29,41	40,76	36,58	31,93
P2O5 (kg/t)	23,08	22,50	20,93	25,51	25,66	23,86
K2O (kg/t)	94,30	53,98	46,96	84,39	107,06	54,07
S (g/t)	4 581,33	1 512,27	1 930,42	12 089,33	21 462,67	5 712,50
As(g/t)	9,51	2,55	3,07	4,39	5,91	4,32
Cr (g/t)	54,00	101,11	59,63	65,04	97,93	52,71
Se (g/t)	4,65	5,17	4,72	4,66	5,04	4,69
Mo (g/t)	2,35	1,86	1,81	2,80	3,69	2,46
Na2O (g/kg)	3,13	1,42	3,44	3,58	3,75	4,15
Ni (g/t)	28,63	26,14	18,07	33,21	30,56	19,81
Cu (g/t)	126,40	86,58	78,39	109,49	141,39	92,11
Zn (g/t)	183,53	28,68	202,13	714,00	630,07	425,17
Cd (g/t)	2,11	0,54	1,87	12,02	13,57	7,05
Pb (g/t)	42,69	7,73	23,22	44,22	64,29	39,07
Hg (g/t)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10
Benzo(a)pyrène (mg/kg)	0,07	0,06	0,05	2,49	0,31	0,05
Benzo(b)fluoranthène (mg/kg)	0,20	0,06	0,05	4,62	0,59	0,05
Fluoranthène (mg/kg)	0,07	0,05	0,05	1,88	0,11	0,05
PCB (mg/kg)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Dioxines (ng/kg)	0	0	0	0	0	0

Source : Biomasse Normandie d'après Biomasse Normandie et CNPF

7. Annexe 7 : Mix électrique

Les mix électriques considérés dans le cadre de cette étude sont les mix de consommation. Leurs compositions sont présentées au tableau ci-dessous :

Tableau 116 : Mix électriques considérés dans l'étude

	France	Europe
Pétrole	0.15%	26.8%
Charbon	1.65%	1.8%
Gaz	1.5%	14.5%
Nucléaire	80.4%	27.9%
Hydraulique	13.2%	12.9%
Eolien & Solaire	3.1%	16.1%

Source : RDC basé sur IEA

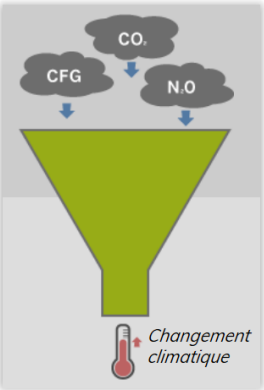
ANNEXES RELATIVES AUX PARTIES 1 & 2

8. Annexe 8 : Description détaillée de la méthodologie suivie pour l'évaluation des impacts environnementaux

8.1. Classification

Lors de l'étape de classification, tous les flux élémentaires sont automatiquement affectés aux catégories d'impact. Par exemple, les substances qui contribuent au changement climatique vont automatiquement être affectées à cette catégorie par le logiciel ACV.

Figure 111 : Méthodologie ACV – Principe de classification



Dans certains cas, un flux peut contribuer à plusieurs catégories d'impact. Par exemple, les chlorofluorocarbones (CFCs) contribuent à la fois au changement climatique et à la destruction de la couche d'ozone.

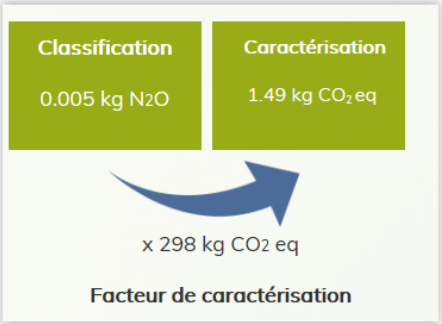
8.2. Caractérisation

Cette étape consiste à calculer l'ampleur de la contribution de chaque flux élémentaire aux différentes catégories d'impact et à agréger l'ensemble des contributions au sein de chaque catégorie.

Ceci est fait en multipliant les quantités de chaque flux élémentaire par leur **facteur de caractérisation** spécifique. Un facteur de caractérisation représente l'intensité de l'impact d'un flux élémentaire exprimé par rapport à une référence commune.

Par exemple, la référence pour le changement climatique est le CO_2. Les flux contribuant à cette catégorie sont exprimés en kg CO_2 équivalent. Le facteur de caractérisation du N_2O est de 298 kg CO_2 eq. Cela veut dire qu'à masses égales, le N_2O a un impact 298 fois plus grand que le CO_2 sur le changement climatique.

Figure 112 : Méthodologie ACV – Principe de caractérisation



8.3. Normalisation

La normalisation n'est pas obligatoire. Les résultats caractérisés sont divisés par un facteur de normalisation, qui correspond à l'impact caractérisé d'un citoyen européen moyen.

Il est ainsi possible d'exprimer les résultats de différentes catégories d'impact dans une même unité de référence, à savoir une personne*an équivalent.

Cependant, les résultats normalisés ne donnent pas d'indice sur la gravité ou la pertinence des différents impacts.

Dans le cadre de cette étude, le set de normalisation retenu est celui proposé dans le cadre des travaux réalisés par la Commission européenne au cours du projet « Product Environmental Footprint ». Les facteurs de normalisation[155] ont été développés sur base des statistiques officielles de données d'inventaires d'émissions et d'utilisation de ressources à l'échelle mondiale.

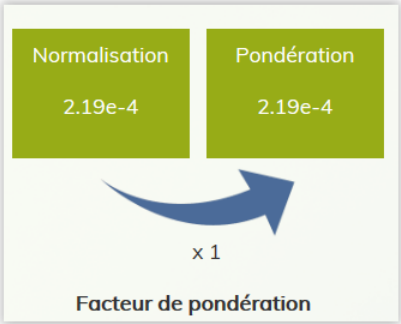
Figure 113 : Méthodologie ACV – Principe de normalisation

8.4. Pondération

La pondération est également une étape optionnelle qui peut aider à l'interprétation et la communication des résultats d'une étude ACV.

Lors de cette étape, les résultats normalisés sont multipliés par des facteurs de pondération qui reflètent l'importance relative perçue des différentes catégories d'impact. Les résultats pondérés peuvent être agrégés entre catégorie d'impacts pour obtenir plusieurs valeurs agrégées intermédiaires ou un score unique.

Figure 114 : Méthodologie ACV – Principe de pondération



La pondération nécessite généralement de poser des jugements de valeur sur les différentes catégories d'impact prises en compte. Ces jugements peuvent se baser sur des avis d'expert, des points de vue politiques/culturels ou sur des considérations économiques.

Elle présente l'avantage d'exprimer les impacts environnementaux en un score unique, ce qui facilite la prise de décision.

En effet, nombreuses sont les études qui ne concluent pas sur la préférence d'un système car il n'est pas le moins impactant pour l'ensemble des indicateurs de catégories d'impacts, mais seulement pour certains. Ces études laissent, *in fine*, le choix au décideur. Ce choix est alors souvent subjectif vis-à-vis de l'importance relative de ces différentes catégories.

[155] https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC109878/kjna28984enn_global_norm_factors.pdf

La pondération est donc une méthode aidant le décideur à ne pas juger uniquement sur son unique « parti pris ».

La pondération des impacts environnementaux est un sujet controversé. En effet, elle fait intervenir une part de subjectivité et de jugement de valeur sur la priorisation de certaines catégories d'impacts vis-à-vis d'autres.

La pondération requiert de donner plus de poids aux impacts qui sont jugés plus « graves ». Elle consiste à pondérer puis agréger des impacts de nature différente, ce qui suppose des « partis-pris ».

Ces facteurs de pondération peuvent varier en fonction de paramètres géographiques (par exemple, les problèmes d'acidification sont plus sensibles en Amérique du Nord qu'en France), temporels (par exemple, la problématique du CO_2 n'a pas la même résonance aujourd'hui qu'il y a dix ans), politiques, culturels et même personnels en fonction de préférences individuelles à caractère philosophique.

Plusieurs méthodes de pondération peuvent être utilisées lors de la réalisation d'une ACV :

- la pondération dite « orientée dommage » ;
- la pondération via un panel ;
- la pondération suivant la distance par rapport à une valeur cible (politique ou scientifique).

Dans le cadre de cette étude, le set de pondération retenu est celui proposé dans le cadre des travaux réalisés par la Commission européenne au cours du projet « Product Environmental Footprint »[156]. La méthode retenue dans le cadre de ce projet pour le développement des facteurs de pondération est celle qui vise à interroger un panel.

Ce panel a été constitué sur base de 3 groupes :

a. Experts ACV de 48 pays différents dans le monde ;
b. Citoyens lambda de 6 pays européens (Allemagne, Italie, Espagne, Grande-Bretagne, Pologne et France) ;
c. Autres experts actifs dans le secteur de l'environnement au sens large.

La pondération des facteurs obtenus via les travaux avec les trois groupes a été la suivante : 25 :25 :50.

Les facteurs de pondération utilisés dans le cadre de cette étude sont repris au Tableau 123.

[156] http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/index.htm

9. Annexe 9 : Description des enjeux environnementaux couverts par les indicateurs de catégorie d'impact

Catégorie d'impact	Définition
Changement climatique	Cette méthode rend compte du forçage radiatif (« réchauffement ») causé par les émissions de gaz à effet de serre. La capacité d'un gaz à effet de serre à influencer le forçage radiatif, son potentiel de réchauffement, est exprimée par rapport à une substance de référence (le CO_2)
Appauvrissement de la couche d'ozone	Cette méthode rend compte de la dégradation de l'ozone stratosphérique à cause de l'émission de substances appauvrissant la couche d'ozone (CFC, HFC…)
Émissions de particules/matières inorganiques respiratoires	Cette méthode rend compte des effets néfastes pour la santé humaine causés par les émissions de particules et de leurs précurseurs (NOx, SOx, NH_3…)
Rayonnement ionisant	Cette méthode rend compte des effets néfastes pour la santé humaine causés par des émissions de substances radioactives
Formation d'ozone photochimique	Cette méthode rend compte de la formation d'ozone troposphérique au niveau du sol, causée par l'oxydation photochimique des composés organiques volatiles (COV) et du monoxyde de carbone (CO) en présence d'oxydes d'azote (NOx) et de lumière du soleil. Des niveaux de concentration élevés en ozone troposphérique engendrent des dommages sur la végétation, les voies respiratoires et les matériaux synthétiques, du fait de réactions avec les matières organiques.
Acidification de l'air	Cette méthode rend compte de l'impact des substances acidifiantes sur l'environnement. Les émissions de NOx, NH3 et SOx entraînent des émissions d'ions hydrogène (H+) lorsque ces gaz sont minéralisés. Ces protons H+ contribuent à l'acidification des sols et des eaux lorsqu'ils sont émis dans des zones présentant des capacités tampon faibles, ce qui aboutit au déclin de la forêt et à l'acidification des lacs.
Eutrophisation terrestre	Cette méthode rend compte de l'impact des nutriments (azote et phosphore principalement), provenant des eaux usées et des terres fertilisées, qui accélèrent la croissance des végétaux dans le sol. La dégradation de la matière organique consomme l'oxygène, aboutissant à un défaut d'oxygène. Seule la concentration en azote est limitante pour l'eutrophisation terrestre.
Eutrophisation de l'eau douce	Cette méthode rend compte de l'impact des nutriments (azote et phosphore principalement), provenant des eaux usées et des terres fertilisées, qui accélèrent la croissance des algues et autres végétaux dans l'eau douce. La dégradation de la matière organique consomme l'oxygène, aboutissant à un défaut d'oxygène. En eau douce, la concentration en phosphore est considéré comme l'élément limitant.
Eutrophisation marine	Cette méthode rend compte de l'impact des nutriments (azote et phosphore principalement), provenant des eaux usées et des terres fertilisées, qui accélèrent la croissance des algues et autres végétaux dans l'eau marine. La dégradation de la matière organique consomme l'oxygène, aboutissant à un défaut d'oxygène. En eau marine, la concentration en azote est considérée comme l'élément limitant.
Utilisation des terres	Cette méthode rend compte de l'occupation et de la transformation de surfaces par des activités (agriculture, routes, logement, mine…). L'occupation considère les effets de l'affectation des sols, la quantité de surfaces et la durée d'occupation (changement de qualité multiplié par surface et durée). La transformation considère l'ampleur des changements de propriétés des sols and la surface affectée (changement de qualité multiplié par surface)
Epuisement de la ressources en eau	Cette méthode rend compte de l'épuisement de la ressource en eau par rapport à la réserve disponible au niveau d'un pays. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer cette réserve disponible.
Utilisation des ressources minérales et métalliques	Cette méthode rend compte de l'ut des ressources minérales et métalliques par rapport à la réserve disponible. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer cette réserve disponible.
Utilisation des ressources fossiles	Cette méthode rend compte de l'épuisement des ressources fossiles par rapport à la réserve disponible. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer cette réserve disponible.

10. Annexe 10 : Méthodologie suivie pour fiabiliser les résultats de l'évaluation environnementale

10.1. Principes suivis

10.1.1. Pour la caractérisation de la qualité des données

Introduction

L'analyse de la qualité des données est utilisée en ACV pour appuyer les conclusions de l'étude. Selon la norme ISO 14 044, cette analyse permet une « *meilleure compréhension de la fiabilité de l'ensemble des résultats d'indicateurs et du profil de l'évaluation de l'impact ».* Cette étape permet de *« mieux comprendre la portée, l'incertitude et la sensibilité des résultats* » lors de la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie.

Lors de la réalisation d'une analyse du cycle de vie, des choix sont réalisés pour modéliser un processus (sur base de données d'activité et de jeux de données d'inventaire) entre :

- l'utilisation des données primaires (spécifiques) ;
- l'utilisation de données secondaires, c'est-à-dire des données issues de bases de données ou d'autres sources.

Ce choix influence la qualité finale de l'ACV.

Caractérisation de la qualité des données

La caractérisation de la qualité peut se réaliser sur l'ensemble des données suivantes :

- les données d'activité ;
- les jeux de données d'inventaires ;
- les facteurs de caractérisation ;
- les facteurs de normalisation et de pondération.

Le mode de caractérisation de la qualité considéré, pour chaque type de données, dans le cadre de cette étude est présenté ci-dessous.

<u>Données d'activité</u>

La caractérisation de la qualité des données d'activité utilisées dans le cadre de cette étude est réalisée en précisant pour chacune d'entre elle :

- le type de données :
- donnée mesurée ;
- donnée calculée ;
- donnée estimée.
- la source de la donnée et la date d'obtention de celle-ci ;
- la mention du type d'hypothèse (conservatrice, etc.).

<u>Jeux de données d'inventaire</u>

La caractérisation de la qualité des jeux de données d'inventaire a été réalisée sur base d'une approche semi-quantitative telle que définie ci-dessous :

- Classification des jeux de données d'inventaire par ordre décroissant des contributions sur le cycle de vie pour toutes les catégories d'impacts étudiées.

  Ce classement est réalisé sur les catégories déterminées comme pertinentes dans l'étude.
- Identification des jeux de données d'inventaire contributeurs pour au moins 80% des impacts sur chaque catégorie d'impact pertinente.
- Évaluation de la qualité de ces jeux de données d'inventaire par un jugement semi-quantitatif basé sur 3 critères :
  - représentativité temporelle (TiR) ;
  - représentativité technologique (TeR) ;
  - représentativité géographique (GR).

Tableau 117 : Critères pour l'évaluation de la qualité des données

TeR	Représentativité technologique	Ce paramètre évalue dans quelle mesure le jeu de données d'inventaire reflète le périmètre technologique du processus considéré
TiR	Représentativité temporelle	Ce paramètre évalue dans quelle mesure le jeu de données d'inventaire reflète le système considéré en ce qui concerne la date/l'âge des données. Ce critère de représentativité temporelle est basé sur la moyenne des deux sous-critères suivants :

		• l'écart entre l'année de référence de l'étude et la fin de la période de validité de l'inventaire de cycle de vie (TiR dataset validity) ; • l'écart entre l'année de référence de l'étude et l'année de référence de l'inventaire de cycle de vie[157] (TiR reference year). $$TiR\ (moyen) = \frac{TiR\ dataset\ validity + TiR\ reference\ year}{2}$$
GR	Représentativité géographique	Ce paramètre évalue dans quelle mesure le jeu de données d'inventaire reflète le périmètre géographique du processus considéré

La qualité globale d'un ensemble de données est la moyenne des notes obtenues pour les quatre critères de qualité mentionnés ci-dessus. Selon les enjeux de l'étude, une pondération différente peut être appliquée à chaque critère.

Exemple du calcul de la qualité globale selon une iso-pondération.

$$\frac{TeR + GR + TiR}{3}$$

La grille de notation globale des jeux de données d'inventaire est la suivante :

Tableau 118 : Grille de notation globale des jeux de données d'inventaire (RDC sur base du PEF)

Note	TiR	TeR	GR
1	Moins de 2 ans par rapport à l'année de référence ou la fin de la période de validité	La technologie visée par l'étude est exactement la même que celle du jeu de données	Le procédé modélisé dans l'étude se déroule dans le pays représenté dans le jeu de données
2	Moins de 5 ans par rapport à l'année de référence ou la fin de la période de validité	La technologie visée par l'étude est couverte par le mix de technologies représenté dans le jeu de données	Le procédé modélisé dans l'étude se déroule dans la zone géographique représentée dans le jeu de données
3	Moins de 10 ans par rapport à l'année de référence ou la fin de la période de validité	La technologie visée par l'étude est partiellement couverte par le périmètre du jeu de données	Le procédé modélisé dans l'étude se déroule dans une des zones géographiques couverte par le jeu de données
4	Moins de 15 ans par rapport à l'année de référence ou la fin de la période de validité	La technologie visée par l'étude est similaire à celle du périmètre du jeu de données	Le procédé modélisé dans l'étude se déroule dans une zone géographique qui n'est pas couverte par le jeu de données mais il y a des similarités suffisantes à dire d'expert
5	Plus de de 15 ans par rapport à l'année de référence ou la fin de la période de validité	La technologie visée par l'étude est différente de celle du périmètre du jeu de données	Le procédé modélisé dans l'étude se déroule dans une zone géographique différente de celle couverte par le jeu de données

La note de qualité obtenue à l'issue de l'évaluation de chaque inventaire permet de juger de la qualité générale de l'étude en fonction des données d'inventaires utilisées.

Tableau 119: Niveau global de qualité des données en fonction des cotes attribuées

Côte globale de la qualité des données	Niveau global de qualité des données
≤ 1,6	Excellente qualité
>1,6 et ≤ 2,0	Très bonne qualité
>2,0 et ≤ 3,0	Bonne qualité
>3 et ≤ 4,0	Qualité satisfaisante
>4	Qualité insuffisante

Méthodes de caractérisation

L'évaluation de la qualité des méthodes de caractérisation a été réalisée par le JRC via l'établissement d'une note de robustesse. Cette note de robustesse est reprise dans le présente étude afin que le lecteur final soit conscient des différences entre enjeux environnementaux.

[157] Année des données collectées ou année représentative des données utilisées pour produire l'inventaire de cycle de vie

La signification des différents est le suivant :

Tableau 120 : Notation utilisée pour le niveau de robustesse des méthodes de caractérisation

I	Recommandé et satisfaisant
II	Recommandé, mais qui a besoin d'améliorations
III	Recommandé, mais à appliquer avec prudence
Interim	En développement

Le niveau de robustesse pour chaque enjeu environnemental est présenté dans le tableau ci-dessous (dernière colonne).

Méthode de normalisation et de pondération

L'évaluation de la qualité des méthodes de normalisation et de pondération a été réalisée par le JRC:

- Pour les facteurs de normalisation**,** via l'évaluation (i) du niveau de complétude des jeux de données d'inventaire utilisés, (ii) du niveau de robustesse de données utilisées pour la détermination des facteurs de normalisation ainsi que (iii) du niveau de robustesse des méthodes de caractérisation.

Les différentes évaluations sont fournies dans le tableau ci-dessous.

Tableau 121 : Évaluation de la qualité des méthodes de caractérisation

	Niveau de complétude des jeux de données d'inventaire	Niveau de robustesse des données	Niveau de recommandation des méthodes de caractérisation
Changement climatique	II	I	I
Appauvrissement de la couche d'ozone	III	II	I
Toxicité humaine - effet cancérigène	III	III	III/interim
Toxicité humaine - effet non cancérigène	III	III	III/interim
Émissions de particules / matières inorganiques respiratoires	I/II	I /II	I
Rayonnement ionisant	II	III	II
Formation d'ozone photochimique	III	I/II	II
Acidification de l'air	II	I/II	II
Eutrophisation terrestre	II	I/II	II
Eutrophisation de l'eau douce	II	III	II
Eutrophisation marine	II	II/III	II
Utilisation des terres	II	II	III
Écotoxicité aquatique	III	III	III/interim
Épuisement des ressources en eau	II	II	III
Utilisation des ressources minérales et métalliques	I	II	III
Utilisation des ressources fossiles	I	II	III

- Pour les facteurs de pondération, via l'établissement d'un facteur de robustesse final (troisième colonne).

Ce facteur de robustesse est repris dans le présente étude afin que le lecteur final soit conscient des différences entre enjeux environnementaux.

Les niveaux de robustesse sont préalablement convertis en note sur base du tableau ci-dessous.

Tableau 122 : Note associée à chaque niveau de robustesse

Niveau de robustesse	Note associée
I	1
I/II	0,8
II	0,6
II/III	0,4
III	0,2
III/interim*	0,1

Le facteur de robustesse final est ensuite calculé comme étant la moyenne entre les trois niveaux fournis dans le tableau ci-dessous.

Exemple pour le changement climatique :

	Niveau de complétude des jeux de données d'inventaire	*Niveau de robustesse des données*	*Niveau de recommandation des méthodes de caractérisation*
Changement climatique	*II → 0,6*	*I → 1*	*I → 1*
	Facteur de robustesse final = B = (0,6+1+1)/3 = 0,87		

Ce facteur de robustesse final est ensuite utilisé pour définir un facteur final de pondération (quatrième colonne).

Tableau 123 : Calcul du facteur final de pondération pour chaque catégorie d'impact

	Facteur de pondération	Facteur de robustesse	Coefficient intermédiaire	Facteur final de pondération
	A	B	C = A*B	Échelle sur 100
Changement climatique	12,90	0,87	11,18	21,06
Appauvrissement de la couche d'ozone	5,58	0,60	3,35	6,31
Toxicité humaine - effet cancérigène	6,80	0,17	1,13	2,13
Toxicité humaine - effet non cancérigène	5,88	0,17	0,98	1,84
Émissions de particules / matières inorganiques respiratoires	5,49	0,87	4,76	8,96
Rayonnement ionisant	5,70	0,47	2,66	5,01
Formation d'ozone photochimique	4,76	0,53	2,54	4,78
Acidification de l'air	4,94	0,67	3,29	6,20
Eutrophisation terrestre	2,95	0,67	1,97	3,71
Eutrophisation de l'eau douce	3,19	0,47	1,49	2,80
Eutrophisation marine	2,94	0,53	1,57	2,96
Écotoxicité aquatique	6,12	0,17	1,02	1,92
Utilisation des terres	9,04	0,47	4,22	7,94
Épuisement des ressources en eau	9,69	0,47	4,52	8,51
Utilisation des ressources minérales et métalliques	6,68	0,60	4,01	7,55
Utilisation des ressources fossiles	7,37	0,60	4,42	8,32

10.1.2. Pour la caractérisation de l'incertitude associée aux résultats

Types, sources et caractérisation des incertitudes

Les sources d'incertitudes dans les ACV peuvent provenir :

- des données d'activité ;
- des jeux de données d'inventaires ;
- des méthodes de caractérisation des impacts ;
- des méthodes de pondération et normalisation.

Les différents types d'incertitudes sont :

- Incertitude systématique : Erreur de mesure.
- Incertitude stochastique : Variabilité inhérente.
- Incertitude épistémique : Manque de connaissance (absence de mesure réelle nécessitant une estimation).

Les incertitudes peuvent être caractérisées par :

- des données statistiques ou distributions de probabilité ;
- des indicateurs de qualité (qui sont la plupart du temps converti ensuite en distribution de probabilité).

Caractérisation des incertitudes par source

<u>Incertitude associée aux données d'activité</u>

L'incertitude liée aux données d'activité est caractérisée en appliquant à chaque donnée d'activité une distribution de probabilité.

Le choix de la distribution peut se faire de façon « scientifique » à partir de tests. Cependant, le peu de données disponibles amène souvent les praticiens à se baser sur des jugements d'expert.

Dans le cadre de cette étude, les paramètres de la distribution statistique (moyenne, écart-type, minimum, maximum, etc.) sont déterminés à partir de mesures expérimentales, de données de littérature ou de jugements d'expert.

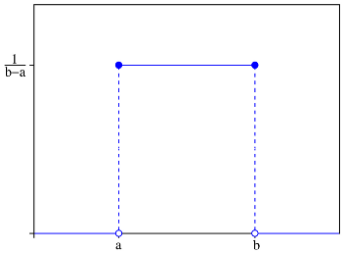
Les modèles de répartition statistique qui peuvent être utilisés sont :

- une répartition uniforme ;
- une répartition selon une loi normale ;
- une répartition selon une loi log-normale ;
- une répartition triangulaire.

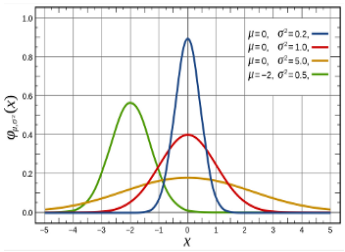
Le comportement des modèles statistiques est représenté graphiquement ci-dessous.

Tableau 124 : Modèles de répartition statistique

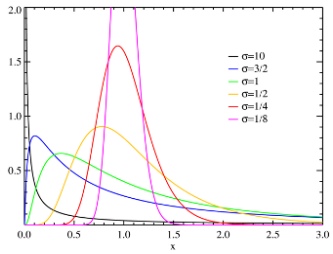
Répartition uniforme



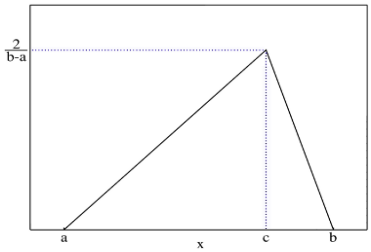
Répartition loi normale



Répartition loi log-normale



Répartition triangulaire



<u>Incertitude associée aux jeux de données d'inventaire</u>

L'incertitude liée aux jeux données d'inventaire est souvent mal prise en compte dans les ACV.

Afin de prendre en compte cette incertitude dans la présente étude, un facteur a été déterminé pour chaque jeu de données d'inventaire sur base de la méthode d'évaluation de la qualité des jeux de données présentée au chapitre 10.1.

Pour ce faire, un facteur d'incertitude (F) a été appliqué à chacune des notes relatives à la qualité (note allant de 1 à 5) afin de déterminer un facteur d'incertitude moyen par jeu de données d'inventaire.

Le facteur d'incertitude (F) est déterminé à dire d'expert sur base du tableau ci-dessous :

Tableau 125 : Facteur d'incertitude associé à la note relative à la qualité des données

Note relative à la qualité des données	Facteur d'incertitude (Fn)
1	1,05
2	1,1
3	1,25
4	1,5
5	2

Le facteur d'incertitude moyen pour un jeu de données d'inventaire est ainsi calculé sur base de la formule suivante :

$$F = \frac{TeR \times Fn + GR \times Fn + TiR \times Fn}{TeR + GR + TIR}$$

Avec :

- (Fn) : facteur d'incertitude et (n) note relative à la qualité (de 1 à 5)
- (TiR) : représentativité temporelle
- (TeR) : représentativité technologique
- (GR) : représentativité géographique
- (F) = Facteur d'incertitude moyen

Ce facteur d'incertitude est ensuite converti en une distribution de probabilité de type loi normale.

Tableau 126 : Distribution associée aux facteurs d'incertitude

Facteur d'incertitude (F)	Distribution de la loi normale	
1.05	Très serrée	N(1, 0,03)
1.1	Serrée	N(1, 0,06)
1.25	Moyenne	N(1, 0,15)
1.5	Plate	N(1, 0,30)
2	Très plate	N(1, 0,50)

Exemple pour un jeu de données d'inventaire fictif

	Note relative à la qualité des données		
	TiR	*TeR*	*Gr*
Donnée 1	*2*	*1*	*2*
Donnée 2	*3*	*3*	*3*
Donnée 3	*3*	*4*	*2*

	Facteur d'incertitude			***Facteur d'incertitude calculé (F)***
	TiR	***TeR***	***Gr***	
Donnée 1	*1,15*	*1,05*	*1,1*	*1,10*
Donnée 2	*1,25*	*1,25*	*1,25*	*1,25*
Donnée 3	*1,25*	*1,5*	*1,1*	*1.28*

Incertitude associée aux méthodes de caractérisation des impacts

L'incertitude associée aux méthodes de caractérisation des impacts n'est actuellement pas prise en compte dans l'évaluation de l'incertitude des résultats. Pour la prendre en compte, il serait nécessaire que les développeurs des méthodes d'évaluation des impacts fournissent les facteurs de caractérisation avec les incertitudes associées.

Incertitude associée aux méthodes de normalisation/pondération

L'incertitude associée aux méthodes de pondération/normalisation des impacts n'est actuellement pas prise en compte dans l'évaluation de l'incertitude des résultats.

Analyse d'incertitude avec RangeLCA

Approche suivie

L'approche suivie pour réaliser ces analyses est une approche Monte-Carlo.

Cette approche échantillonne au hasard une valeur sur les distributions de probabilités spécifiées (la probabilité qu'une valeur soit sélectionnée est proportionnelle à sa densité de probabilité) et calcule le résultat associé de contribution à un enjeu environnemental. Le calcul est répété un nombre défini de simulations, ce qui conduit à une distribution statistique du résultat. Plus le nombre de simulations est élevé, plus la distribution obtenue se rapproche de la distribution réelle des résultats.

Finalement, à partir de cette analyse Monte-Carlo, il est possible de :

- déterminer un résultat moyen (= moyenne des simulations) ;
- déterminer la distribution de l'incertitude autour du résultat moyen ;

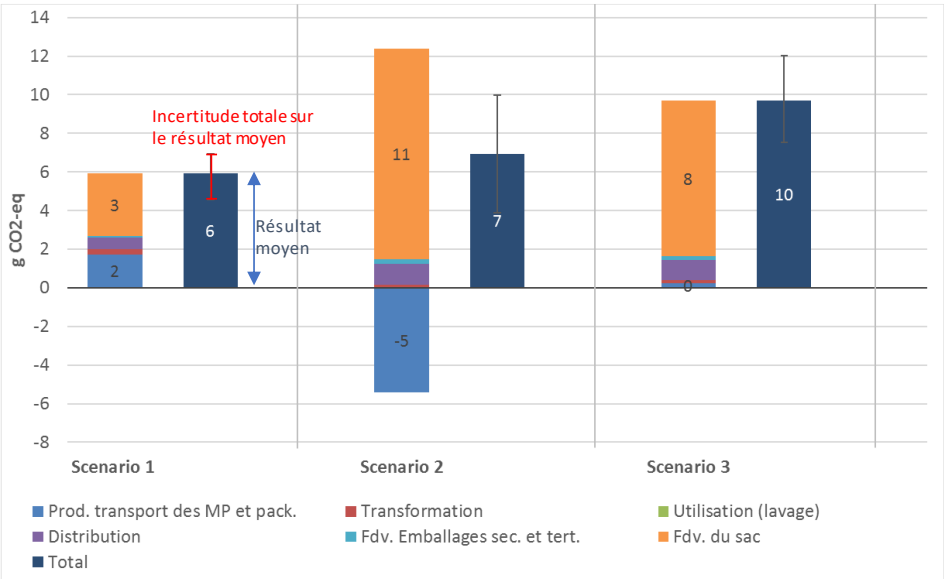
Présentation graphique de l'analyse d'incertitude

L'incertitude totale sur le résultat moyen de chaque scénario est calculée en déterminant :

- la valeur maximale minorée de la valeur moyenne ;
- la valeur moyenne minorée la valeur minimale.

L'incertitude sur les résultats moyens prend en compte l'ensemble de l'incertitude relative au scénario étudié. Le résultat moyen et l'incertitude totale s'expriment graphiquement de la manière suivante :

Tableau 127 : Graphe de type « Boite à moustache » - Résultat moyen et incertitude sur le résultat moyen



Des précautions sont à prendre lors de l'interprétation réalisée sur base de ce type de figure. En effet, lorsque l'incertitude totale de différents scénarios est présentée sur une même figure, pour pouvoir tirer des conclusions claires sur la préférence d'un scénario par rapport à un autre, il est nécessaire de réaliser des comparaisons deux à deux afin d'enlever l'incertitude commune.

10.2. Evaluation de la qualité des jeux de données d'inventaire

10.2.1. Pour les jeux de données relatifs à la partie 1

Les notes de qualité attribuées aux jeux de données d'inventaire sont présentées dans le tableau suivant

Tableau 128 : Qualité des jeux de données d'inventaire utilisées dans la partie 1

Phase	Nom de l'inventaire de cycle de vie		TiR-dataset validity	TiR - reference year	TiR	TeR	Gr	Total
Gestion sylvicole	Chestnut roundwood (> 7cm), hauled, 80% water on dry mass basis, at forest road (m³)	FCBA	1	1	1	2	1	1,3
	Douglas-fir roundwood, over bark, eco alloc, hauled, 65% water on dry mass basis, at forest road (m³)	FCBA	1	1	1	2	1	1,3
	Douglas-fir roundwood, over bark, vol alloc, hauled, 65% water on dry mass basis, at forest road (m³)	FCBA	1	1	1	2	1	1,3
	_Douglas-fir stump, over bark, hauled, 65% water on dry mass basis, at forest road (m³)	FCBA	1	1	1	2	1	1,3
	Douglas residus from thinning, forwarded, at forest road (m³)	FCBA	1	1	1	2	1	1,3
	Eucalyptus, SRC, stem+residus, forwarded, 108% water on dry mass basis, at forest road (m³)	FCBA	1	1	1	2	1	1,3
	Average, oak, industrial wood, round wood, vol allocation	FCBA	1	1	1	2	1	1,3

Phase	Nom de l'inventaire de cycle de vie		TiR-dataset validity	TiR - reference year	TiR	TeR	Gr	Total
	Oak crown residus from regular stand, over bark, forwarded, 80% water on dry mass basis (m³)	FCBA	1	1	1	2	1	1,3
	Transformation d'un taillis en futaie de douglas + dessouchage (m³)	FCBA	1	1	1	2	1	1,3
	Average, industrial wood, round wood, economic allocation (m³)	FCBA	1	1	1	2	1	1,3
Préparation du combustible	market for diesel, low-sulfur, Europe without Switzerland, (kg)	EI v3.5	2	2	2	2	2	2,0
	wood chipping, mobile chipper, at forest road, RER, (hour)	EI v3.5	2	3	2,5	2	2	2,2
	market for electricity, medium voltage, FR (kWh)	EI v3.5	2	2	2	2	1	1,7
	market for electricity, high voltage, FR (kWh)	EI v3.5	2	2	2	2	1	1,7
	heat production, softwood chips from forest, at furnace 1000kW (MJ)	EI v3.5	2	2	2	2	2	2,0
	heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW (MJ)	EI v3.5	2	2	2	2	2	2,0
	furnace production, logs, average storage area, 30kW (MJ)	EI v3.5	2	2	2	2	2	2,0
	heat production, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW (MJ)	EI v3.5	2	2	2	2	2	2,0
	heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW (MJ)	EI v3.5	2	2	2	2	2	2,0
	heat production, light fuel oil, at boiler 100kW, non-modulating (MJ)	EI v3.5	2	2	2	2	2	2,0
Chaufferie	ammonium bicarbonate production (kg)	EI v3.5	3	3	3	2	2	2,3
	lime production, hydrated, packed (kg)	EI v3.5	3	3	3	2	2	2,3
	quicklime production, milled, packed (kg)	EI v3.5	3	3	3	2	2	2,3
	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state (kg)	EI v3.5	3	3	3	2	2	2,3
	market for water, deionised, from tap water, at user (kg)	EI v3.5	3	3	3	2	2	2,3
	market for chemical, organic (kg)	EI v3.5	3	3	3	4	2	3,0
	carbon black production (kg)	EI v3.5	3	3	3	2	2	2,3
	market for ammonia, liquid (kg)	EI v3.5	3	3	3	2	2	2,3
	market for urea, as N (kg)	EI v3.5	3	3	3	2	2	2,3
	market for furnace, wood chips, with silo, 1000kW (unit)	EI v3.5	3	2	2,5	2	2	2,2
Transport	Heavy Duty Trucks Articulated 34 - 40 t - Diesel - Euro III/IV/V/VI - Urban/Rural/Highway (t,km)	COPERT V	1	1	1	1	2	1,3
	Heavy Duty Trucks Articulated 14 - 20 t - Diesel - Euro III/IV/V/VI - Urban/Rural/Highway (t.km)	COPERT V	1	1	1	1	2	1,3
	market for diesel, low-sulfur (kg)	EI v3.5	2	2	2	2	2	2,0
	market for lorry, 40 metric ton (unit)	EI v3.5	3	2	2,5	2	3	2,5
	market for maintenance, lorry 40 metric ton (unit)	EI v3.5	3	2	2,5	2	3	2,5
	market for used lorry, 40 metric ton (unit)	EI v3.5	3	2	2,5	2	3	2,5
	market for road (m*year)	EI v3.5	3	2	2,5	2	3	2,5
	market for road maintenance (m*year)	EI v3.5	3	2	2,5	2	3	2,5
	market for decommissioned road (m*year)	EI v3.5	3	2	2,5	2	3	2,5
	freight ship production, transoceanic (unit)	EI v3.5	3	2	2,5	2	3	2,5
	maintenance, freight ship, transoceanic (unit)	EI v3.5	3	2	2,5	2	3	2,5
	port facilities construction (unit)	EI v3.5	3	2	2,5	2	3	2,5
	market group for heavy fuel oil (kg)	EI v3.5	3	2	2,5	2	2	2,2

10.2.2. Pour les jeux de données relatifs à la partie 2

Les notes de qualité attribuées aux jeux de données d'inventaire sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 129 : Qualité des jeux de données d'inventaire utilisées dans la partie 2

Phase	Nom de l'inventaire de cycle de vie	TiR-dataset validity	TiR - reference year	TiR	TeR	Gr	Total
Production du gaz naturel	Natural gas, high pressure, US / GB / NL / NO / RU (hors fuites) – Ecoinvent 3.5	3	1	2	1	1	1,3
	Natural gas, high pressure, RoW (hors fuites) – Ecoinvent 3.5	3	1	2	1	3	2,0
Transport international du gaz naturel	Transport, freight, sea, tanker for liquefied natural gas, GLO – Ecoinvent 3.6	4	1	2,5	1	2	1,8
	Liquéfaction du gaz naturel – Modélisation RDC à partir des données de l'étude de la Commission européenne	3	1	2	1	2	1,7
	Transport, pipeline, long distance, natural gas, RoW (hors fuites et auto-consommation) – Ecoinvent 3.5	5	1	3	1	3	2,3
	Transport, pipeline, long distance, natural gas, NL / NO / RER / RU (hors fuites et auto-consommation) – Ecoinvent 3.5	5	1	3	1	1	1,7
	Auto-consommation du transport par pipeline – Modélisation RDC à partir des données de l'étude de la Commission européenne	3	2	2,5	1	1	1,5
Distribution du gaz naturel	Natural gas, burned in gas motor, for storage, NL (re-gazéification du gaz liquéfié) – Ecoinvent 3.5	5	1	3	2	2	2,3
	Transport, pipeline, long distance, natural gas, NL – Ecoinvent 3.5	5	1	3	1	2	2,0
	Natural gas, burned in gas motor, for storage, NL (consummation pour la distribution par pipeline) – Ecoinvent 3.5	5	1	3	1	2	2,0
	Production et fin de vie d'une chaudière – Modélisation RDC	4	4	4	2	3	3,0

10.3. Prise en compte de l'incertitude dans l'évaluation environnementale

10.3.1. Pour les scénarios étudiés dans la partie 1

La prise en compte de l'incertitude liée aux jeux de données est présentée aux figures suivantes pour les différents enjeux environnementaux et les 6 scénarios.

Il est à noter que les enjeux environnementaux qui dépendent principalement des émissions directes présentent une variation plus faible des résultats liée à cette incertitude. Il s'agit des enjeux suivants :

- Emissions de particules ;
- Acidification de l'air ;
- Eutrophisation terrestre.

Figure 115 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « changement climatique » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en kg CO_2 éq) – Filière bioénergie

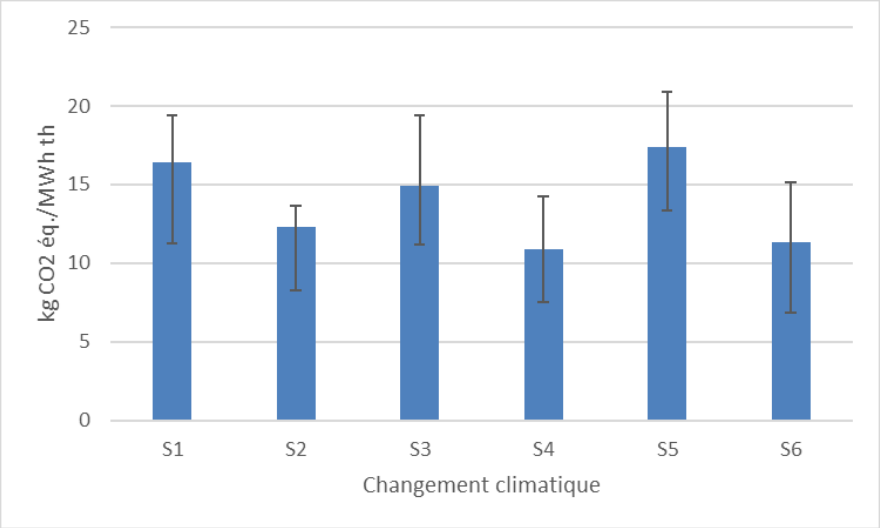


Figure 116 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Utilisation des ressources fossiles et nucléaires » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en MJ éq) – Filière bioénergie

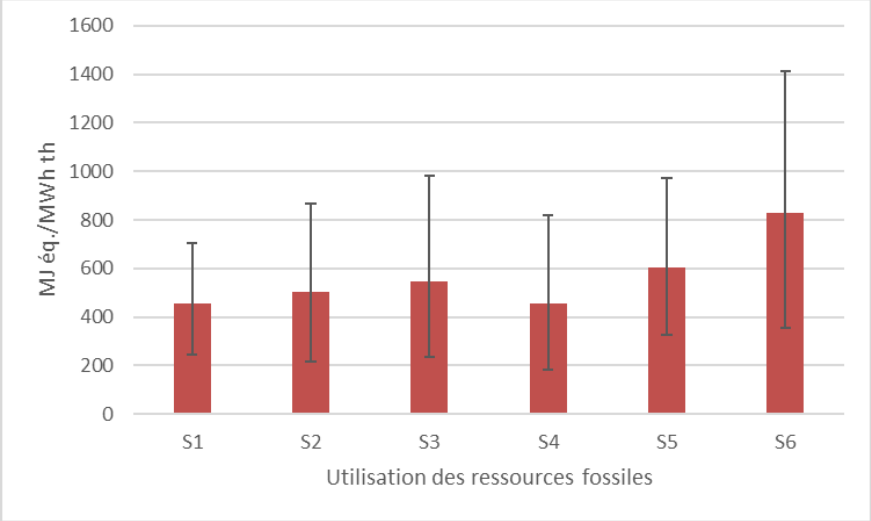


Figure 117 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Émissions de particules » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en incidences de maladie) – Filière bioénergie

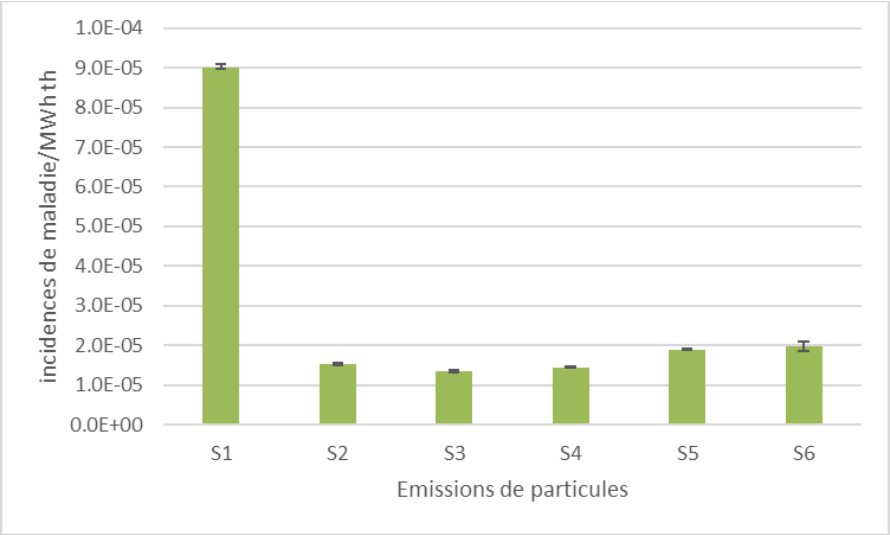


Figure 118 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Utilisation des terres » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en point) – Filière bioénergie

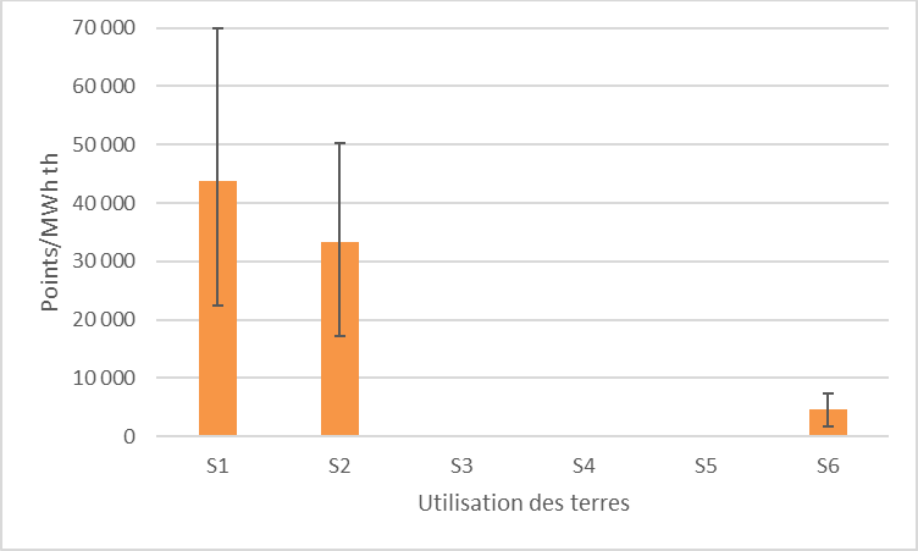


Figure 119 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Acidification de l'air » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en moles H+ éq.) – Filière bioénergie

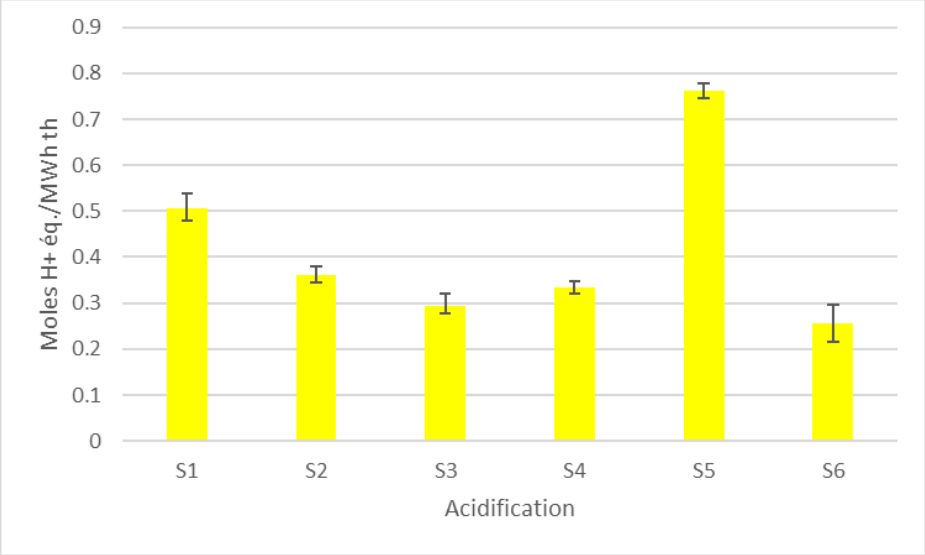
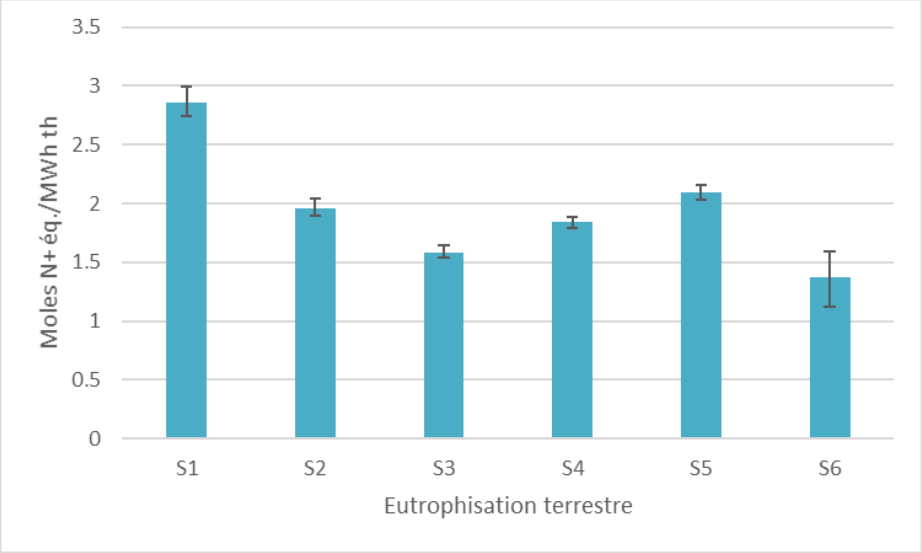


Figure 120 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Eutrophisation terreste » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en moles N+ éq.) – Filière bioénergie



Certaines variations des résultats sont du même ordre de grandeur que celles présentées dans les analyses de sensibilité dans les chapitres 5.3.1, 5.3.2 et 5.3.3 de la partie 1 et résumées au chapitre 4.3 de la partie 2.

10.3.2. Pour les scénarios étudiés dans la partie 2

La prise en compte de l'incertitude liée aux jeux de données est présentée aux figures suivantes pour les différents enjeux environnementaux et pour le scénario GAZ 2018.

Figure 121 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « changement climatique » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en kg CO_2 éq) – Filière gaz 2018

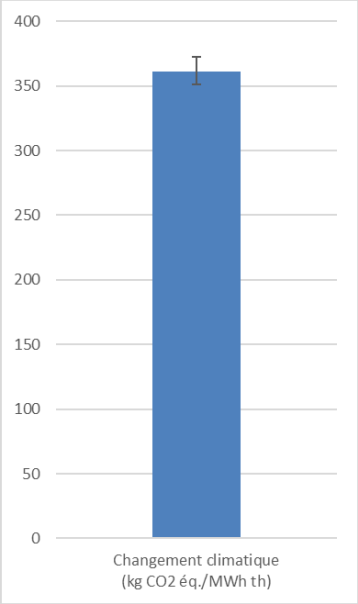


Figure 122 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Utilisation des ressources fossiles et nucléaires » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en MJ éq) – Filière gaz 2018

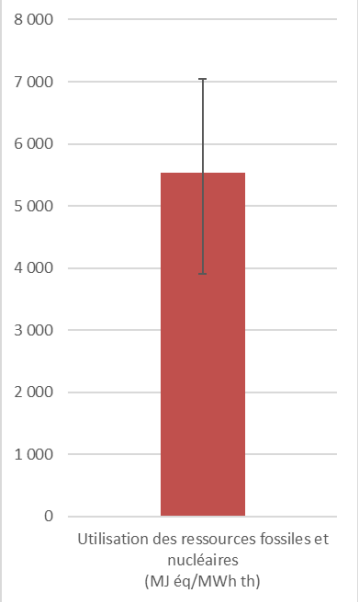


Figure 123 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Émissions de particules » et la production d'1 MWhPCI (exprimé en incidences de maladie) – Filière gaz 2018

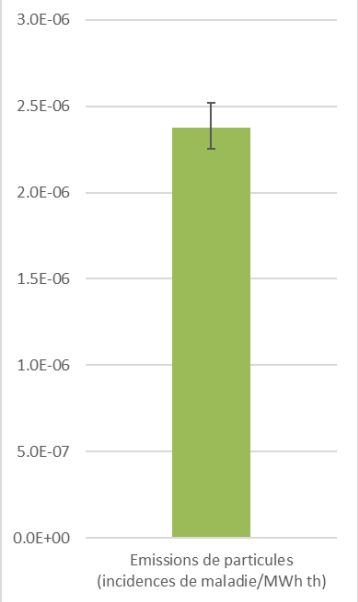


Figure 124 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Utilisation des terres » et la production d'1 MWhPCI (exprimé en point) – Filière gaz 2018

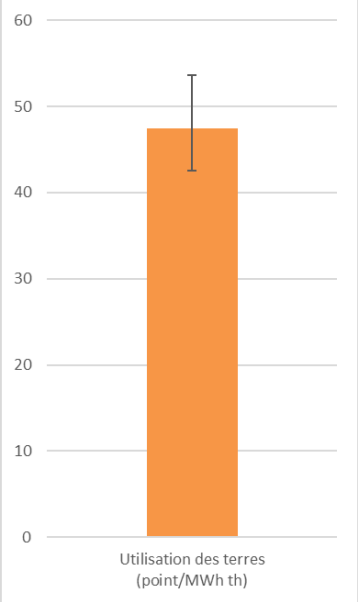


Figure 125 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Acidification de l'air » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en moles H+ éq.) – Filière gaz 2018

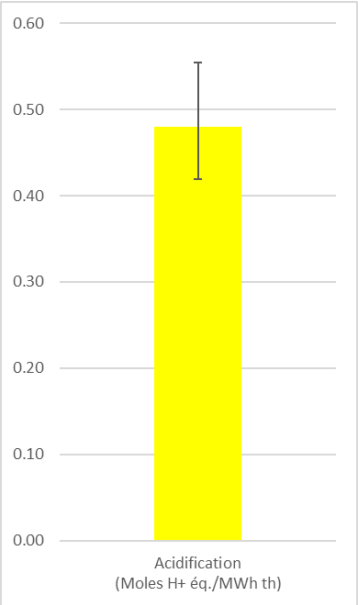
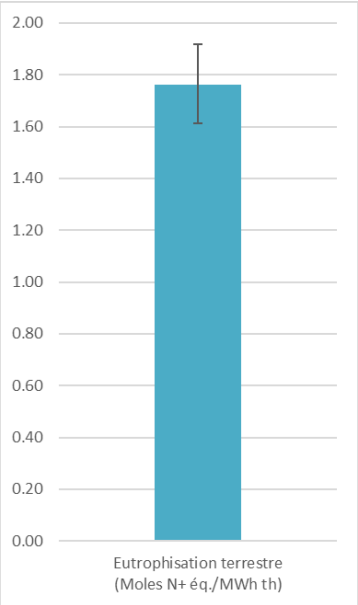


Figure 126 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Eutrophisation terreste » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en moles N+ éq.) – Filière gaz 2018



Certaines variations des résultats sont du même ordre de grandeur que celles présentées dans les analyses de sensibilité au chapitre 4.3 de la partie 2.

11. Annexe 11 : Résultats en valeur absolue

11.1. Résultats relatifs à la partie 1

11.1.1. Résultats normalisés et pondérés

Tableau 130 : Résultats normalisés et pondérés pour les scénarios 1 à 6 en valeur absolue par enjeu environnemental (points PEF)

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Appauvrissement de la couche d'ozone	0,0011	0,0010	0,0009	0,0008	0,0012	0,0012
Épuisement des ressources minérales et métalliques	0,0041	0,0025	0,0041	0,0024	0,0048	0,0065
Rayonnement ionisant	0,0148	0,0212	0,0211	0,0210	0,0215	0,0430
Formation d'ozone photochimique	0,0256	0,0158	0,0047	0,0056	0,0114	0,0199
Épuisement des ressources fossiles	0,0621	0,0683	0,0737	0,0622	0,0822	0,1127
Eutrophisation de l'eau douce	0,0037	0,0032	0,0075	0,0031	0,0046	0,0050
Utilisation des terres	0,2767	0,2104	0,0002	0,0003	0,0004	0,0294
Eutrophisation terrestre	0,0631	0,0434	0,0349	0,0408	0,0464	0,0302
Eutrophisation marine	0,0036	0,0024	0,0009	0,0013	0,0024	0,0052
Changement climatique	0,0430	0,0308	0,0273	0,0269	0,0455	0,0309
Épuisement des ressources en eau	0,0033	0,0042	0,0097	0,0037	0,0079	0,0083
Acidification	0,0606	0,0433	0,0353	0,0402	0,0914	0,0306
Émissions de particules / matières inorganiques respiratoires	1,3501	0,2288	0,2002	0,2170	0,2844	0,2967
Total valeurs absolues	1,9118	0,6752	0,4205	0,4254	0,6040	0,6198

Tableau 131 : Résultats normalisés et pondérés pour les scénarios 1 à 6 en pourcentage de contribution de chaque enjeu à l'empreinte totale

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Appauvrissement de la couche d'ozone	0,1 %	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Épuisement des ressources minérales et métalliques	0,2 %	0,4 %	1,0 %	0,6 %	0,8 %	1,0 %
Rayonnement ionisant	0,8 %	3,1 %	5,0 %	4,9 %	3,6 %	6,9 %
Formation d'ozone photochimique	1,3 %	2,3 %	1,1 %	1,3 %	1,9 %	3,2 %
Épuisement des ressources fossiles	3,2 %	10,1 %	17,5 %	14,6 %	13,6 %	18,2 %
Eutrophisation de l'eau douce	0,2 %	0,5 %	1,8 %	0,7 %	0,8 %	0,8 %
Utilisation des terres	14,5 %	31,2 %	0,0 %	0,1 %	0,1 %	4,7 %
Eutrophisation terrestre	3,3 %	6,4 %	8,3 %	9,6 %	7,7 %	4,9 %
Eutrophisation marine	0,2 %	0,4 %	0,2 %	0,3 %	0,4 %	0,8 %
Changement climatique	2,2 %	4,6 %	6,5 %	6,3 %	7,5 %	5,0 %
Épuisement des ressources en eau	0,2 %	0,6 %	2,3 %	0,9 %	1,3 %	1,3 %
Acidification	3,2 %	6,4 %	8,4 %	9,4 %	15,1 %	4,9 %
Émissions de particules / matières inorganiques respiratoires	70,6 %	33,9 %	47,6 %	51,0 %	47,1 %	47,9 %

Tableau 132 : Résultats normalisés et pondérés pour les scénarios 1 à 6 en valeur absolue par étape du cycle de vie (points PEF)

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Gestion sylvicole	3,45E-01	2,63E-01	0	0	0	0
Broyage en bord de route	2,59E-02	1,97E-02	0	0	0	0
Transport vers plateforme de conditionnement	1,39E-02	0	0	0	0	0
Séchage	2,59E-03	0	0	0	0	0
Concassage	0	0	0	1,85E-02	2,17E-02	0
Broyage rapide	0	0	0	1,80E-02	2,12E-02	0
Criblage	7,65E-03	0	0	0	1,01E-02	0
Transport vers chaufferie	1,31E-02	8,89E-03	0	9,31E-03	9,31E-03	2,72E-02
Chaufferie - émissions	1,49E+00	3,66E-01	3,30E-01	3,66E-01	4,78E-01	3,44E-01
Chaufferie - consommation	1,41E-02	1,70E-02	8,78E-02	1,28E-02	6,32E-02	1,04E-02
Chaufferie - cendres	5,20E-04	6,29E-04	2,26E-03	5,78E-04	5,91E-04	1,58E-04
Préparation du granulé	0	0	0	0	0	2,38E-01
TOTAL	1,91E+00	6,75E-01	4,20E-01	4,25E-01	6,04E-01	6,20E-01

11.1.2. Contribution des différentes filières aux enjeux environnementaux

Tableau 133 : Scénario 1 - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}

	Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC_{11} éq./MWh_{th})	Épuisement des ressources minérales et métalliques (kg Sb éq./MWh_{th})	Rayonnement ionisant (kBq U_{235} éq./MWh_{th})	Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC éq./MWh_{th})	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq./MWh_{th})	Eutrophisation de l'eau douce (kg P éq /MWh_{th})	Utilisation des terres (points/MWh_{th})	Eutrophisation terrestre (moles N éq/ MWh_{th})	Eutrophisation marine (kg N éq/ MWh_{th})	Épuisement des ressources en eau (m^3/MWh_{th})	Acidification (moles H^+ éq./MWh_{th})	Émissions de particules (incidence de maladie/MWh_{th})	Changement climatique (kg CO_2 éq./MWh_{th})
Gestion sylvicole	1,17E-06	3,41E-06	0,332	0,119	82,034	5,35E-05	43620	0,20	0,0	0,79	0,044	1,07E-06	4,6
Captation C par la biomasse													-563,1
Broyage en bord de route	6,94E-07	4,95E-06	0,219	0,016	46,08	0,00023	10,52	0,055	0,0050	0,31	0,015	7,85E-08	3,9
Transport vers plateforme de conditionnement	3,94E-07	6,64E-06	0,132	0,007	27,33	0,00019	27,60	0,023	0,0021	0,24	0,007	5,45E-08	1,8
Séchage	0	0	0	0,015	0	0	0	0	0	0	0	0	102,3
Concassage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Broyage rapide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Criblage	1,59E-07	7,71E-07	0,045	0,008	12,22	0,00026	2,12	0,031	0,0032	-0,30	0,007	6,72E-08	18,8
Transport vers chaufferie	3,37E-07	8,08E-06	0,120	0,007	24,56	0,00023	33,40	0,023	0,0020	0,25	0,007	5,92E-08	1,5
Chaufferie - émissions	0	0	0	0,025	0	0	0	2,502	0	0	0,415	8,87E-05	442,7
Chaufferie - consommation	1,22E-06	6,17E-06	10,765	0,006	263,36	0,00091	8,38	0,025	0,0024	3,40	0,011	1,51E-07	2,4
Chaufferie - cendres	-8,81E-09	-5,35E-07	-0,005	-0,0003	-0,79	0,00131	-0,64	-0,001	-0,0001	-0,50	-0,001	-7,52E-09	1,6
TOTAL	3,96E-06	2,95E-05	11,607	0,204	454,79	0,00319	43701	2,858	0,0328	4,19	0,507	9,01E-05	16,4

La quantité de combustible nécessaire pour la production de 1 MWh th dans le scénario 1 est de 326 kg.

Tableau 134 : Scénario 2 - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}

	Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC_{11} éq./MWh_{th})	Épuisement des ressources minérales et métalliques (kg Sb éq./MWh_{th})	Rayonnement ionisant (kBq U_{235} éq./MWh_{th})	Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC éq./MWh_{th})	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq./MWh_{th})	Eutrophisation de l'eau douce (kg P éq /MWh_{th})	Utilisation des terres (points/MWh_{th})	Eutrophisation terrestre (moles N éq/ MWh_{th})	Eutrophisation marine (kg N éq/ MWh_{th})	Épuisement des ressources en eau (m^3/MWh_{th})	Acidification (moles H^+ éq./MWh_{th})	Émissions de particules (incidence de maladie/MWh_{th})	Changement climatique (kg CO_2 éq./MWh_{th})
Captation C par la biomasse													-428,7
Broyage en bord de route	5,28E-07	3,76E-06	0,166	0,013	35,07	0,00017	8,01	0,042	0,0038	0,23	0,011	5,97E-08	2,9
Transport vers plateforme de conditionnement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Séchage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concassage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Broyage rapide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Criblage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers chaufferie	2,52E-07	4,24E-06	0,085	0,005	17,46	0,00012	17,63	0,015	0,0013	0,15	0,005	3,48E-08	1,1
Chaufferie - émissions	0	0	0	0,010	0	0	0	1,720	0	0	0,297	1,42E-05	428,6
Chaufferie - consommation	1,74E-06	7,68E-06	16,145	0,008	385,12	0,00127	11,02	0,035	0,0033	4,86	0,015	2,01E-07	3,2
Chaufferie - cendres	-5,08E-09	-3,91E-07	-0,003	-0,0001	-0,42	0,00116	-0,14	-0,001	0	-0,47	0	-5,36E-09	1,6
TOTAL	3,41E-06	1,79E-05	16,645	0,126	499,67	0,00277	33240	1,963	0,0222	5,38	0,362	1,53E-05	12,3

La quantité de combustible nécessaire pour la production de 1 MWh th dans le scénario 2 est de 395 kg.

Tableau 135 : Scénario 3 - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}

	Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC_{11} éq./MWh_{th})	Épuisement des ressources minérales et métalliques (kg Sb éq./MWh_{th})	Rayonnement ionisant (kBq U_{235} éq./MWh_{th})	Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC éq./MWh_{th})	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq./MWh_{th})	Eutrophisation de l'eau douce (kg P éq /MWh_{th})	Utilisation des terres (points/MWh_{th})	Eutrophisation terrestre (moles N éq/ MWh_{th})	Eutrophisation marine (kg N éq/ MWh_{th})	Épuisement des ressources en eau (m^3/MWh_{th})	Acidification (moles H^+ éq./MWh_{th})	Émissions de particules (incidence de maladie/MWh_{th})	Changement climatique (kg CO_2 éq./MWh_{th})
Gestion sylvicole	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Captation C par la biomasse													-540,9
Broyage en bord de route	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers plateforme de conditionnement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Séchage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concassage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Broyage rapide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Criblage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers chaufferie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chaufferie - émissions	0	0	0	0,012	0	0	0	1,465	0,0007	0	0,244	1,26E-05	540,9
Chaufferie - consommation	3,03E-06	3,04E-05	16,584	0,026	541,17	0,00243	27,48	0,119	0,0079	13,98	0,052	8,20E-07	9,7
Chaufferie - cendres	-1,68E-08	-1,34E-06	-0,009	-0,0004	-1,40	0,00402	-0,46	-0,002	-0,0002	-1,59	-0,001	-1,80E-08	5,3
TOTAL	3,02E-06	2,91E-05	16,574	0,038	539,77	0,00644	27	1,582	0,0085	12,39	0,295	1,34E-05	14,9

La quantité de combustible nécessaire pour la production de 1 MWh th dans le scénario 3 est de 583 kg.

Tableau 136 : Scénario 4 - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}

	Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC_{11} éq./MWh_{th})	Épuisement des ressources minérales et métalliques (kg Sb éq./MWh_{th})	Rayonnement ionisant (kBq U_{235} éq./MWh_{th})	Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC éq./MWh_{th})	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq./MWh_{th})	Eutrophisation de l'eau douce (kg P éq /MWh_{th})	Utilisation des terres (points/MWh_{th})	Eutrophisation terrestre (moles N éq/ MWh_{th})	Eutrophisation marine (kg N éq/ MWh_{th})	Épuisement des ressources en eau (m^3/MWh_{th})	Acidification (moles H^+ éq./MWh_{th})	Émissions de particules (incidence de maladie/MWh_{th})	Changement climatique (kg CO_2 éq./MWh_{th})
Gestion sylvicole	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
Captation C par la biomasse													-442,7
Broyage en bord de route	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers plateforme de conditionnement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Séchage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concassage	4,96E-07	3,54E-06	0,156	0,012	32,96	0,00016	7,54	0,0393	0,0036	0,22	0,011	5,6E-08	2,8
Broyage rapide	4,60E-07	3,53E-06	0,146	0,012	30,77	0,00016	7,45	0,0390	0,0035	0,21	0,010	5,5E-08	2,7
Criblage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers chaufferie	2,64E-07	4,44E-06	0,089	0,005	18,28	0,00013	18,47	0,015	0,0014	0,16	0,005	3,6E-08	1,2
Chaufferie - émissions	0	0	0	0,010	0	0	0	1,7203	0	0	0,297	1,4E-05	442,7
Chaufferie - consommation	1,65E-06	6,16E-06	16,100	0,007	374,06	0,00117	9,52	0,032	0,0030	4,61	0,013	1,7E-07	2,8
Chaufferie - cendres	-4,67E-09	-3,59E-07	-0,003	-0,0001	-0,39	0,00106	-0,13	-0,001	0,0000	-0,43	0,000	-4,9E-09	1,4
TOTAL	2,87E-06	1,73E-05	16,489	0,045	455,68	0,00269	43	1,845	0,0114	4,77	0,336	1,4E-05	10,9

La quantité de combustible nécessaire pour la production de 1 MWh th dans le scénario 4 est de 296 kg.

Tableau 137 : Scénario 5 - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}

	Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC_{11} éq./MWh_{th})	Épuisement des ressources minérales et métalliques (kg Sb éq./MWh_{th})	Rayonnement ionisant (kBq U_{235} éq./MWh_{th})	Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC éq./MWh_{th})	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq./MWh_{th})	Eutrophisation de l'eau douce (kg P éq /MWh_{th})	Utilisation des terres (points/MWh_{th})	Eutrophisation terrestre (moles N éq/ MWh_{th})	Eutrophisation marine (kg N éq/ MWh_{th})	Épuisement des ressources en eau (m^3/MWh_{th})	Acidification (moles H^+ éq./MWh_{th})	Émissions de particules (incidence de maladie/MWh_{th})	Changement climatique (kg CO_2 éq./MWh_{th})
Gestion sylvicole	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Captation C par la biomasse													-468,7
Broyage en bord de route	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers plateforme de conditionnement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Séchage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concassage	5,84E-07	4,16E-06	0,18	0,014	38,81	0,00019	8,88	0,046	0,0042	0,26	0,012	6,60E-08	3,25
Broyage rapide	5,42E-07	4,16E-06	0,17	0,014	36,25	0,00019	8,78	0,046	0,0042	0,25	0,012	6,45E-08	3,23
Criblage	1,65E-07	1,08E-06	0,05	0,011	13,67	0,00037	2,85	0,044	0,0046	-0,45	0,009	9,41E-08	26,9
Transport vers chaufferie	2,64E-07	4,44E-06	0,09	0,005	18,28	0,00013	18,47	0,015	0,0014	0,16	0,005	3,64E-08	1,2
Chaufferie - émissions	0	0	0	0,026	0	0	0	1,8641	0,0007	0	0,687	1,82E-05	442,7
Chaufferie - consommation	2,53E-06	2,11E-05	16,41	0,022	495,27	0,00205	21,28	0,086	0,0063	10,23	0,038	5,71E-07	7,4
Chaufferie - cendres	-4,55E-09	-3,57E-07	0,00	-0,0001	-0,38	0,00107	-0,12	-0,001	0,0000	-0,43	0,000	-4,86E-09	1,4
TOTAL	4,08E-06	3,46E-05	16,90	0,090	601,90	0,00399	60	2,101	0,0214	10,02	0,764	1,90E-05	17,4

La quantité de combustible nécessaire pour la production de 1 MWh th dans le scénario 5 est de 296 kg.

Tableau 138 : Scénario 6 - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}

	Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC_{11} éq./MWh_{th})	Épuisement des ressources minérales et métalliques (kg Sb éq./MWh_{th})	Rayonnement ionisant (kBq U_{235} éq./MWh_{th})	Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC éq./MWh_{th})	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq./MWh_{th})	Eutrophisation de l'eau douce (kg P éq /MWh_{th})	Utilisation des terres (points/MWh_{th})	Eutrophisation terrestre (moles N éq/ MWh_{th})	Eutrophisation marine (kg N éq/ MWh_{th})	Épuisement des ressources en eau (m^3/MWh_{th})	Acidification (moles H^+ éq./MWh_{th})	Émissions de particules (incidence de maladie/MWh_{th})	Changement climatique (kg CO_2 éq./MWh_{th})
Gestion sylvicole	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Captation C par la biomasse													-417,3
Broyage en bord de route	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers plateforme de conditionnement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Séchage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concassage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Broyage rapide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Criblage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers chaufferie	7,70E-07	1,30E-05	0,259	0,014	53,39	0,00038	53,92	0,045	0,0041	0,47	0,015	1,06E-07	3,4
Chaufferie - émissions	0	0	0	0,007	0	0	0	0,821644444	0	0	0,130	1,75E-05	403,1
Chaufferie - consommation	1,04E-06	4,74E-06	9,547	0,005	228,66	0,00077	6,73	0,021	0,0020	2,90	0,009	1,21E-07	1,9
Chaufferie - cendres	-2,67E-09	-1,62E-07	-0,001	-0,0001	-0,24	0,00040	-0,19	0	0	-0,15	0	-2,28E-09	0,5
Préparation du granulé	2,50E-06	2,91E-05	24,017	0,133	542,99	0,00282	4582	0,481	0,0415	7,39	0,103	2,06E-06	19,6
TOTAL	4,30E-06	4,66E-05	33,822	0,158	824,80	0,00436	4642	1,368	0,0475	10,61	0,256	1,98E-05	11,3

La quantité de combustible nécessaire pour la production de 1 MWh th dans le scénario 6 est de 241 kg.

Tableau 139 : Scénario 7 et Scénario 8 - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}

	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq./MWh_{th})		Utilisation des terres (points/MWh_{th})		Acidification (moles H^+ éq./MWh_{th})		Émissions de particules (incidence de maladie/MWh $_{th}$)		Changement climatique (kg CO_2 éq./MWh_{th})	
	S7	S8	**S7**	S8	**S7**	S8	**S7**	S8	**S7**	S8
Gestion sylvicole	61,8	62,4	32867,0	33203,3	0,033	0,03	8,03E-07	8,11E-07	3,5	3,5
Captation C par la biomasse									-424,3	-428,7
Broyage en bord de route	34,7	35,1	7,9	8,0	0,011	0,01	5,91E-08	5,97E-08	2,9	2,9
Transport vers plateforme de conditionnement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Séchage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concassage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Broyage rapide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Criblage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers chaufferie	17,3	17,5	17,5	17,6	0,005	0	3,44E-08	3,48E-08	1,1	1,1
Chaufferie - émissions	0	0	0	0	0,271	0,24	1,24E-05	1,26E-05	424, 3	428,6
Chaufferie - consommation	384,7	385,1	11,0	11,0	0,015	0,01	2,00E-07	2,01E-07	3,2	3,2
Chaufferie - cendres	-0,2	-0,4	-0,1	-0,1	0	0	-2,92E-09	-5,32E-09	1,1	1,8
TOTAL	498,3	499,7	32903,3	33239,8	0,335	0,31	1,35E-05	1,37E-05	11,8	12,6

Tableau 140 : Scénario 9 et variante méthodologique du scénario 9 (résolution de la multifonctionalité par affectation selon le contenu énergétique plutôt que par élargissement des frontières du système) - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}

	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq./MWh_{th})		Utilisation des terres (points/MWh_{th})		Acidification (moles H^+ éq./MWh_{th})		Émissions de particules (incidence de maladie/MWh_{th})		Changement climatique (kg CO_2 éq./MWh_{th})	
	S9	S9 variante	**S9**	S9 variante	**S9**	S9 variante	**S9**	S9 variante	**S9**	S9 variante
Gestion sylvicole	96,5	47,3	51314,2	25143,9	0,05	0,026	1,25E-06	6,15E-07	5,4	2,7
Captation C par la biomasse									-662,5	-324,6
Broyage en bord de route	54,2	26,6	12,4	6,1	0,02	0,008	9,23E-08	4,52E-08	4,5	2,2
Transport vers plateforme de conditionnement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Séchage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concassage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Broyage rapide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Criblage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers chaufferie	27,0	13,2	27,3	13,4	0,01	0,004	5,38E-08	2,63E-08	1,7	0,9
Chaufferie - émissions	0	0	0	0	0,38	0,185	1,94E-05	9,52E-06	662,4	324,6
Chaufferie - consommation	556,9	360,8	16,5	15,3	0,02	0,028	3,00E-07	4,43E-07	4,8	5,3
Chaufferie - cendres	-0,6	-0,3	-0,2	-0,1	0	0	-8,22E-09	-4,03E-09	2,9	1,2
TOTAL	733,9	447,5	51370,1	25178,6	0,48	0,250	2,11E-05	1,06E-05	19,4	12,2

Tableau 141 : Variantes du scénario 1 (passage d'un séchage naturel à un séchage forcé ; passage d'un broyage en bord de route à un broyage sur plateform industrielle) - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}

	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq./MWh_{th})		Utilisation des terres (points/MWh_{th})		Acidification (moles H^+ éq./MWh_{th})		Émissions de particules (incidence de maladie/MWh_{th})		Changement climatique (kg CO_2 éq./MWh_{th})	
	S1 variante séchage	S1 variante broyage	S1 variante séchage	S1 variante broyage	S1 variante séchage	S1 variante broyage	S1 variante séchage	S1 variante broyage	S1 variante séchage	S1 variante broyage
Gestion sylvicole	71,7	73,0	38146,7	38821,0	0,04	0,04	9,32E-07	9,49E-07	4,0	4,1
Captation C par la biomasse									-492,5	-501,2
Broyage en bord de route	40,3	0	9,2	0	0,01	0	6,86E-08	0	3,4	0
Transport vers plateforme de conditionnement	23,9	24,3	24,1	24,6	0,01	0,01	4,76E-08	4,85E-08	1,5	1,6
Dechiquetage plateforme	0	36,7	0	7,4	0	0,01	0	5,67E-08	0	2,7
Séchage	445,6	0,0	2884,1	0,0	0,05	0	2,99E-06	0	27,5	0
Concassage	0	36,7	0	7,4	0	0,01	0	5,67E-08	0	2,7
Broyage rapide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Criblage	12,2	13,3	2,1	2,5	0,01	0,01	6,72E-08	7,83E-08	18,8	22,0
Transport vers chaufferie	24,6	25,2	33,4	34,2	0,01	0,01	5,92E-08	6,07E-08	1,5	1,6
Chaufferie - émissions	0	0	0	0	0,41	0,41	8,87E-05	8,87E-05	474,4	479,9
Chaufferie - consommation	263,4	269,8	8,4	9,2	0,01	0,01	1,51E-07	1,67E-07	2,4	2,7
Chaufferie - cendres	-0,8	-0,8	-0,6	-0,6	0	0	-7,52E-09	-7,65E-09	1,6	1,6
TOTAL	880,9	478,1	41107,4	38905,7	0,55	0,51	9,30E-05	9,01E-05	42,6	17,6

Tableau 142 : Variantes du scénario 2 (augmentation de la distance de transport de 35 à 200 km ; augmentation de la distance de transport de 35 à 500 km) - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}

	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq./MWh_{th})		Utilisation des terres (points/MWh_{th})		Acidification (moles H^+ éq./MWh_{th})		Émissions de particules (incidence de maladie/MWh_{th})		Changement climatique (kg CO_2 éq./MWh_{th})	
	S2 variante 200 km	S2 variante 500 km	S2 variante 200 km	S2 variante 500 km	S2 variante 200 km	S2 variante 500 km	S2 variante 200 km	S2 variante 500 km	S2 variante 200 km	S2 variante 500 km
Gestion sylvicole	62,4	62,4	33203,3	33203,3	0,03	0,03	8,11E-07	8,11E-07	3,5	3,5
Captation C par la biomasse									-428,7	-428,7
Broyage en bord de route	35,1	35,1	8,0	8,0	0,01	0,01	5,97E-08	5,97E-08	2,9	2,9
Transport vers plateforme de conditionnement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Séchage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concassage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Broyage rapide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Criblage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers chaufferie	99,7	249,1	100,7	251,6	0,03	0,07	1,99E-07	4,97E-07	6,4	16,1
Chaufferie - émissions	0	0	0	0	0,30	0,30	1,42E-05	1,42E-05	428,6	428,6
Chaufferie - consommation	385,1	385,1	11,0	11,0	0,01	0,01	2,01E-07	2,01E-07	3,2	3,2
Chaufferie - cendres	-0,4	-0,4	-0,1	-0,1	0	0	-5,36E-09	-5,36E-09	1,6	1,6
TOTAL	581,9	731,4	33322,8	33473,8	0,38	0,42	1,54E-05	1,57E-05	17,6	27,3

Tableau 143 : Variantes du scénario 2 (mise en place d'un SNCR avec 40, 55 ou 70 % d'abbatement) - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}

	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq./MWh_{th})			Utilisation des terres (points/MWh_{th})			Acidification (moles H^+ éq./MWh_{th})			Émissions de particules (incidence de maladie/MWh_{th})			Changement climatique (kg CO_2 éq./MWh_{th})		
	S2 variante SNCR 40 %	S2 variante SNCR 55 %	S2 variante SNCR 70 %	S2 variante SNCR 40 %	S2 variante SNCR 55 %	S2 variante SNCR 70 %	S2 variante SNCR 40 %	S2 variante SNCR 55 %	S2 variante SNCR 70 %	S2 variante SNCR 40 %	S2 variante SNCR 55 %	S2 variante SNCR 70 %	S2 variante SNCR 40 %	S2 variante SNCR 55 %	S2 variante SNCR 70 %
Gestion sylvicole	62,4	62,4	62,4	33203,3	33203,3	33203,3	0,03	0,03	0,03	8,11E-07	8,11E-07	8,11E-07	3,5	3,5	3,5
Captation C par la biomasse													-428,7	-428,7	-428,7
Broyage en bord de route	35,1	35,1	35,1	8,0	8,0	8,0	0,01	0,01	0,01	5,97E-08	5,97E-08	5,97E-08	2,9	2,9	2,9
Transport vers plateforme de conditionnement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Séchage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concassage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Broyage rapide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Criblage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers chaufferie	17,5	17,5	17,5	17,6	17,6	17,6	0	0	0	3,48E-08	3,48E-08	3,48E-08	1,1	1,1	1,1
Chaufferie - émissions	0	0	0	0	0	0	0,22	0,19	0,15	1,43E-05	1,43E-05	1,43E-05	428,6	428,6	428,6
Chaufferie - consommation	476,4	476,4	476,4	20,2	20,2	20,2	0,04	0,04	0,04	5,85E-07	5,85E-07	5,85E-07	7,0	7,0	7,0
Chaufferie - cendres	-0,4	-0,4	-0,4	-0,1	-0,1	-0,1	0	0	0	-5,36E-09	-5,36E-09	-5,36E-09	1,6	1,6	1,6
TOTAL	591,0	591,0	591,0	33249,0	33249,0	33249,0	0,31	0,27	0,24	1,58E-05	1,58E-05	1,58E-05	16,1	16,1	16,1

Tableau 144 : Variantes du scénario 2 (dépassement de la règlementation pour les 6 polluants étudiés via : une multiplication par 2 du facteur d'émission pour tous les polluants ; une multiplication par 5 du facteur d'émission pour tous les polluants sauf les NO_x ; une multiplication par 5 du facteur d'émission pour tous les polluants sauf le CO) - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}

	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq./MWh_{th})			Utilisation des terres (points/MWh_{th})			Acidification (moles H^+ éq./MWh_{th})			Émissions de particules (incidence de maladie/MWh $_{th}$)			Changement climatique (kg CO_2 éq./MWh_{th})		
	S2 variante émissions x2	S2 variante émissions x5 NO_x cst	S2 variante émissions x5 CO cst	S2 variante émissions x2	S2 variante émissions x5 NO_x cst	S2 variante émissions x5 CO cst	S2 variante émissions x2	S2 variante émissions x5 NO_x cst	S2 variante émissions x5 CO cst	S2 variante émissions x2	S2 variante émissions x5 NO_x cst	S2 variante émissions x5 CO cst	S2 variante émissions x2	S2 variante émissions x5 NO_x cst	S2 variante émissions x5 CO cst
Gestion sylvicole	62,4	62,4	62,4	33203,3	33203,3	33203,3	0,03	0,03	0,03	8,11E-07	8,11E-07	8,11E-07	3,5	3,5	3,5
Captation C par la biomasse													-428,7	-428,7	-428,7
Broyage en bord de route	35,1	35,1	35,1	8,0	8,0	8,0	0,01	0,01	0,01	5,97E-08	5,97E-08	5,97E-08	2,9	2,9	2,9
Transport vers plateforme de conditionnement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Séchage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concassage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Broyage rapide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Criblage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers chaufferie	17,5	17,5	17,5	17,6	17,6	17,6	0	0	0	3,48E-08	3,48E-08	3,48E-08	1,1	1,1	1,1
Chaufferie - émissions	0	0	0	0	0	0	0,59	0,51	1,49	2,83E-05	7,09E-05	7,09E-05	428,9	429,6	428,6
Chaufferie - consommation	385,1	385,1	385,1	11,0	11,0	11,0	0,01	0,01	0,01	2,01E-07	2,01E-07	2,01E-07	3,2	3,2	3,2
Chaufferie - cendres	-0,4	-0,4	-0,4	-0,1	-0,1	-0,1	0	0	0	-5,36E-09	-5,36E-09	-5,36E-09	1,6	1,6	1,6
TOTAL	499,7	499,7	499,7	33239,8	33239,8	33239,8	0,66	0,57	1,55	2,94E-05	7,20E-05	7,20E-05	12,6	13,3	12,3

Tableau 145 : Variantes du scénario 2 (respect de la nouvelle règlementation en termes de polluants atmosphériques ; mise en place d'un condensateur)[158].

	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq./MWh_{th})		Utilisation des terres (points/MWh_{th})		Acidification (moles H^+ éq./MWh_{th})		Émissions de particules (incidence de maladie/MWh $_{th}$)		Changement climatique (kg CO_2 éq./MWh_{th})	
	S2 variante nouv. règl.	S2 variante condenseur	S2 variante nouv. règl.	S2 variante condenseur	S2 variante nouv. règl.	S2 variante condenseur	S2 variante nouv. règl.	S2 variante condenseur	S2 variante nouv. règl.	S2 variante condenseur
Gestion sylvicole	62,4	55,9	33203,3	29708,2	0,03	0,03	8,11E-07	7,26E-07	3,5	3,1
Captation C par la biomasse									-428,7	-383,5
Broyage en bord de route	35,1	31,4	8,0	7,2	0,01	0,01	5,97E-08	5,34E-08	2,9	2,6
Transport vers plateforme de conditionnement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Séchage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concassage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Broyage rapide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Criblage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers chaufferie	17,5	15,6	17,6	15,8	0	0	3,48E-08	3,11E-08	1,1	1,0
Chaufferie - émissions	0	0	0	0	0,24	0,27	9,62E-06	1,14E-05	428,6	383,5
Chaufferie - consommation	385,1	344,6	11,0	9,9	0,01	0,01	2,01E-07	1,80E-07	3,2	2,9
Chaufferie - cendres	-0,4	-0,4	-0,1	-0,1	0	0	-5,36E-09	-4,79E-09	1,6	1,4
TOTAL	499,7	447,1	33239,8	29740,9	0,30	0,32	1,07E-05	1,24E-05	12,3	11,0

[158] La variante allocation économique à la place d'une allocation volumique entre le BI et le BO n'est pas présente dans le tableau car elle concerne une seule étape du cyble de vie. Cette variante est traitée dans le rapport pour l'étape de gestion forestière (cf. Tableau 84-85).

Tableau 146 : Variante du scénario 3 (passage d'une chaufferie de puissance 5-50 MW à une chaufferie de puissance > 50 MW présentant de plus faibles émissions de poussières et de NO_x) - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}

	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq./MWh_{th})	Utilisation des terres (points/MWh_{th})	Acidification (moles H^+ éq./MWh_{th})	Émissions de particules (incidence de maladie/MWh $_{th}$)	Changement climatique (kg CO_2 éq./MWh_{th})
Gestion sylvicole	0	0	0	0	0
Captation C par la biomasse					0
Broyage en bord de route	0	0	0	0	0
Transport vers plateforme de conditionnement	0	0	0	0	0
Séchage	0	0	0	0	0
Concassage	0	0	0	0	0
Broyage rapide	0	0	0	0	0
Criblage	0	0	0	0	0
Transport vers chaufferie	0	0	0	0	0
Chaufferie - émissions	0	0	0,21	6,54E-06	0
Chaufferie - consommation	541,2	27,5	0,05	8,20E-07	9,7
Chaufferie - cendres	-1,4	-0,5	0,00	-1,80E-08	5,3
TOTAL	539,8	27,0	0,26	7,34E-06	14,9

Tableau 147 : Variantes du scénario 6 (passage d'un combustible écorce et broyat de palettes au combustible gaz naturel pour le séchage des granulés ; passage d'un séchage en chaufferie à un séchage en unité de cogénération) - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par $MWht_h$

	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq./MWh_{th})		Utilisation des terres (points/MWh_{th})		Acidification (moles H^+ éq./MWh_{th})		Émissions de particules (incidence de maladie/MWh_{th})		Changement climatique (kg CO_2 éq./MWh_{th})	
	S6 variante combustible séchage	S6 variante installation séchage	S6 variante combustible séchage	S6 variante installation séchage	S6 variante combustible séchage	S6 variante installation séchage	S6 variante combustible séchage	S6 variante installation séchage	S6 variante combustible séchage	S6 variante installation séchage
Gestion sylvicole	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Captation C par la biomasse									-417,3	-417,3
Broyage en bord de route	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers plateforme de conditionnement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Séchage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concassage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Broyage rapide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Criblage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers chaufferie	53,4	53,4	53,9	53,9	0,01	0,01	1,06E-07	1,06E-07	3,4	3,4
Chaufferie - émissions	0	0	0	0	0,13	0,13	1,75E-05	1,75E-05	403,1	403,1
Chaufferie - consommation	228,7	228,7	6,7	6,7	0,01	0,01	1,21E-07	1,21E-07	1,9	1,9
Chaufferie - cendres	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	0,00	0,00	-2,28E-09	-2,28E-09	0,5	0,5
Préparation du granulé	1136,4	143,4	45,8	4575,7	0,05	0,09	2,87E-07	1,95E-06	41,8	17,9
TOTAL	1418,2	425,2	106,3	4636,2	0,20	0,25	1,80E-05	1,97E-05	33,5	9,6

Tableau 148 : Variantes du scénario 6 (passage de granulés français à des granulés américains ; allocation d'un impact aux connexes utilisés pour fabriquer les granulés) - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}

	Utilisation des ressources fossiles (MJ éq./MWh_{th})		Utilisation des terres (points/MWh_{th})		Acidification (moles H^+ éq./MWh_{th})		Émissions de particules (incidence de maladie/MWh_{th})		Changement climatique (kg CO_2 éq./MWh_{th})	
	S6 variante granulé américain	S6 variante allocation impact	S6 variante granulé américain	S6 variante allocation impact	S6 variante granulé américain	S6 variante allocation impact	S6 variante granulé américain	S6 variante allocation impact	S6 variante granulé américain	S6 variante allocation impact
Gestion sylvicole	0	6,9	0	1804,2	0	0	0	1,10E-07		0,4
Captation C par la biomasse									-417,3	-806,2
Broyage en bord de route	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers plateforme de conditionnement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Séchage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concassage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Broyage rapide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Criblage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers chaufferie	152,6	106,8	154,2	107,8	0,04	0,03	3,04E-07	2,13E-07	9,9	3,4
Chaufferie - émissions	0	0,0	0	0,0	0,13	0,13	1,75E-05	1,75E-05	403,1	792,1
Chaufferie - consommation	228,7	457,3	6,7	13,5	0,01	0,02	1,21E-07	2,43E-07	1,9	1,9
Chaufferie - cendres	-0,2	-0,5	-0,2	-0,4	0,00	0,00	-2,28E-09	-4,56E-09	0,5	0,5
Préparation du granulé	1227,2	543,0	4867,6	4581,6	0,23	0,10	2,83E-06	2,06E-06	64,0	19,6
TOTAL	1608,2	1113,5	5028,3	6506,7	0,41	0,28	2,08E-05	2,01E-05	62,1	11,7

11.1.3. Influence de la source d'approvisionnement de la biomasse

Tableau 149 : Contribution à l'utilisation des ressources fossiles et au changement climatique (en excluant le carbone biogénique) des différentes filières de production de la biomasse utilisée pour produire les plaquettes forestières

	Utilisation des ressources fossiles (MJ/MWh th)							Changement climatique (kg éq CO_2/MWh th)						
	Taillis feuillus	Futaie résineux	Futaie résineux - MB	Futaie résineux - Souches	Futaie feuillus	Futaie feuillus - MB	Deprise agricole - TCR Eucalyptus	Taillis feuillus	Futaie résineux	Futaie résineux - MB	Futaie résineux - Souches	Futaie feuillus	Futaie feuillus - MB	Deprise agricole - TCR Eucalyptus
Gestion sylvicole	62,4	115,9	47,1	190,9	49,6	35,6	111,3	3,5	7,3	3,0	12,3	2,7	2,1	8,4
Broyage en bord de route	35,1	38,8	38,8	43,4	35,1	35,1	35,5	2,9	3,3	3,3	3,6	2,9	2,9	3,0
Transport vers plateforme de conditionnement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Séchage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concassage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Broyage rapide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Criblage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers chaufferie	17,5	18,0	18,0	20,2	17,5	17,5	25,8	1,1	1,2	1,2	1,3	1,1	1,1	1,7
Chaufferie - émissions	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Chaufferie - consommation	385,12	386,10	386,10	391,41	385,12	385,12	389,81	3,22	3,26	3,26	3,47	3,22	3,22	3,40
Chaufferie - cendres	-0,42	-0,47	-0,47	-2,91	-0,42	-0,42	-0,43	1,55	1,72	1,72	10,69	1,55	1,55	1,57
Préparation des granulés et transport vers chaufferie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	499,7	558,4	489,6	642,9	486,8	472,8	561,9	12,6	16,9	12,7	31,6	11,8	11,2	18,2

11.1.4. Mise en perspective des filières bois énergie (S1-S6)

Tableau 150 : Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « acidification de l'air », « émissions de particules », « utilisation de terres » et « utilisation de ressources fossiles et nucléaires » et la production d'1 MWh_{th}

	Acidification (moles H+ éq./MWhth)						Emissions de particules (incidence de maladie/MWh_{th})						Utilisation des terres (points/MWh_{th})						Utilisation des ressources fossiles et nucléaires (MJ éq./MWh_{th})					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Gestion sylvicole	0,044	0,034	0	0	0	0	1,07E-06	8,11E-07	0	0	0	0	43619,9	33203,3	0	0	0	0	82,0	62,4	0	0	0	0
Broyage en bord de route	0,015	0,011	0	0	0	0	7,85E-08	5,97E-08	0	0	0	0	10,5	8,0	0	0	0	0	46,1	35,1	0	0	0	0
Transport vers plateforme de conditionnement	0,01	0	0	0	0	0	5,45E-08	0	0	0	0	0	27,6	0	0	0	0	0	27,3	0	0	0	0	0
Séchage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concassage	0	0	0	0,011	0,012	0	0	0	0	5,60E-08	6,60E-08	0	0	0	0	7,5	8,9	0	0	0	0	33,0	38,8	0
Broyage rapide	0	0	0	0,010	0,012	0	0	0	0	5,47E-08	6,45E-08	0	0	0	0	7,5	8,8	0	0	0	0	30,8	36,2	0
Criblage	0,0	0	0	0	0,009	0	6,72E-08	0	0	0	9,41E-08	0	2,1	0	0	0	2,9	0	12,2	0	0	0	13,7	0
Transport vers chaufferie	0,007	0,005	0,000	0,005	0,005	0,015	5,92E-08	3,48E-08	0	3,64E-08	3,64E-08	1,06E-07	33,4	17,6	0	18,5	18,5	53,9	24,6	17,5	0	18,3	18,3	53,4
Chaufferie - émissions	0,415	0,297	0,244	0,297	0,687	0,130	8,87E-05	1,42E-05	1,26E-05	1,42E-05	1,82E-05	1,75E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chaufferie - consommation	0,011	0,015	0,052	0,013	0,038	0,009	1,51E-07	2,01E-07	8,20E-07	1,74E-07	5,71E-07	1,21E-07	8,4	11,0	27,5	9,5	21,3	6,7	263,4	385,1	541,2	374,1	495,3	228,7
Chaufferie - cendres	-0,001	-0,0003	-0,001	-0,0003	-0,0003	-0,0002	-7,52E-09	-5,36E-09	-1,80E-08	-4,92E-09	-4,86E-09	-2,28E-09	-0,6	-0,1	-0,5	-0,1	-0,1	-0,2	-0,8	-0,4	-1,4	-0,4	-0,4	-0,2
Préparation du granulé	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	2,06E-06	0	0	0	0	0	4581,6	0	0	0	0	0	543,0
TOTAL	0,5	0,4	0,3	0,3	0,8	0,3	9,01E-05	1,53E-05	1,34E-05	1,45E-05	1,90E-05	1,98E-05	43701,2	33239,8	27,0	42,9	60,1	4642,1	454,8	499,7	539,8	455,7	601,9	824,8

Tableau 151 : Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « changement climatique » et la production d'1 MWhPCI suivant deux modes de comptabilisation (bilan GES global avec comptabilité totale absorptions/émissions biogéniques et Neutralité carbone)

	Changement climatique (kg éq CO2/MWh th)											
	S1		S2		S3		S4		S5		S6	
	Bilan GES global avec comptabilité totale	*Neutralité carbone*	*Bilan GES global avec comptabilité totale*	*Neutralité carbone*	*Bilan GES global avec comptabilité totale*	*Neutralité carbone*	*Bilan GES global avec comptabilité totale*	*Neutralité carbone*	*Bilan GES global avec comptabilité totale*	*Neutralité carbone*	*Bilan GES global avec comptabilité totale*	*Neutralité carbone*
Gestion sylvicole	4,6	4,6	3,5	3,5	0		0		0		0	
Captation de C	-563,1	0	-428,7		-540,9		-442,7		-468,7		-417,3	
Broyage en bord de route	3,9	3,9	2,9	2,9	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport vers plateforme de conditionnement	1,8	1,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Séchage	102,3	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concassage	0	0	0	0	0	0	2,8	2,8	3,2	3,2	0	0
Broyage rapide	0	0	0	0	0	0	2,7	2,7	3,2	3,2	0	0
Criblage	18,8	0,4	0	0	0	0	0	0	26,9	0,9	0	0
Transport vers chaufferie	1,5	1,5	1,1	1,1	0	0	1,2	1,2	1,2	1,2	3,4	3,4
Chaufferie - émissions	442,7	0	428,6		540,9		442,7		442,7		403,1	
Chaufferie - consommation	2,4	2,4	3,2	3,2	9,7	9,7	2,8	2,8	7,4	7,4	1,9	1,9
Chaufferie - cendres	1,6	1,6	1,6	1,6	5,3	5,3	1,4	1,4	1,4	1,4	0,5	0,5
Préparation du granulé	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19,6	5,4
TOTAL	16,4	16,4	12,3	12,3	14,9	14,9	10,9	10,9	17,4	17,4	11,3	11,3

11.2. Résultats relatifs à la partie 2 - Résultats normalisés et pondérés

Tableau 152 : Résultats normalisés et pondérés pour les scénarios « gaz 2018 » et « gaz 2030 » en valeur absolue par enjeu environnemental et en répartition en %

	Gaz 2018		Gaz 2030	
	points	%	points	%
Appauvrissement de la couche d'ozone	0,0042	0,2 %	0,0060	0,3 %
Épuisement des ressources minérales et métalliques	0,0114	0,5 %	0,0132	0,6 %
Rayonnement ionisant	0,0252	1,2 %	0,0257	1,1 %
Formation d'ozone photochimique	0,0679	3,2 %	0,0804	3,6 %
Épuisement des ressources fossiles	0,7611	36,2 %	0,8172	36,1 %
Eutrophisation de l'eau douce	0,0052	0,2 %	0,0066	0,3 %
Utilisation des terres	0,0003	0,0 %	0,0004	0,0 %
Eutrophisation terrestre	0,0389	1,9 %	0,0444	2,0 %
Eutrophisation marine	0,0179	0,8 %	0,0204	0,9 %
Changement climatique - non adapté	1,0323	49,1 %	1,0899	48,2 %
Épuisement des ressources en eau	0,0441	2,1 %	0,0442	2,0 %
Acidification	0,0574	2,7 %	0,0719	3,2 %
Émissions de particules / matières inorganiques respiratoires	0,0356	1,7 %	0,0409	1,8 %

ANNEXES RELATIVES A LA PARTIE 3

12. Annexe 12 : Bibliographie

Achat, D. L., Fortin, M., Landmann, G., Ringeval, B., & Augusto, L. (2015). Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting. *Scientific Reports*, *5*, 15991.

ADEME, Benoist, A., Cornillier, C., & Piednoir, B. (2015). *Etude préliminaire à la réalisation de bilans environnementaux sur le chauffage au bois - Partie 1: état de l'art*.

ADEME, Colin, A., & Thivolle-Cazat, A. (2016). *Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035*.

Bourgeois, C., & Sevrin, É. (Eds.). (2004). *Le châtaignier: un arbre, un bois* (2e éd). Institut pour le développement forestier.

Cecillon, L., Soucemarianadin, L., Berthelot, A., Duverger, M., De Boisseson, J.-M., Gosselin, F., Guenet, B., Barthes, B., De Danieli, S., Barrier, R., Abiven, S., Chenu, C., Girardin, C., Baudin, F., Savignac, F., Nicolas, M., Meriguet, J., & Barre, P. (2017). *PiCaSo - Pilotage sylvicole et contrôle pédologique des stocks de carbone des sols forestiers*. ADEME.

CNPF, & Ministère de la transition écoloqique et solidaire. (2019). *Label Bas-Carbone Méthode Boisement*.

Colin, A. (2014). *Emissions et absorptions de gaz à effet de serre liées au secteur forestier et au développement de la biomasse énergie en France aux horizons 2020 et 2030 - Tâches C et D. Contribution de l'IGN aux projections de puis de CO2 dans la biomasse des forêts gérées de France Métropolitaine en 2020 et 2030 selon différents scénarios d'offre de bois.* (Convention MEDDE DGEC/EGN N°2200682886). IGN.

Colin, A. (2018). *Contribution de l'IGN à l'établissement des bilans carbone des forêts des EPCI concernés par un PCAET - volet dendrométrique*. IGN - ADEME.

Colin, A., Barnérias, C., Salis, M., Thivolle-Cazat, A., Coulon, F., & Couturier, C. (2009). *Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020*. ADEME - IFN - FCBA - SOLAGRO.

Cornillier, C., & Benoist, A. (2015). *Etude préliminaire à la réalisation de bilans environnementaux sur le chauffage au bois - Partie 3: recommandations méthodologiques*. ADEME.

Cornillier, C., Fortin, M., Vial, E., Cailly, P., & Martel, S. (2018). *Projet GESFOR - Bilan environnemental des systèmes forestiers vis-à-vis du changement climatique et des autres enjeux : pour une optimisation des pratiques sylvicoles et des politiques territoriales*. ADEME.

Cowie, A., Berndes, G., & Smith, T. (2013). *On the timing of greenhouse gas mitigation benefits of forest-based bioenergy*. International Energy Agency.

Dhôte, J.-F., Roux, A., Schmitt, B., Bastick, C., Colin, A., Rigolot, É., Bastien, J.-C., Leban, J.-M., & Gardiner, B. (2017a). *Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ?*

Dhôte, J.-F., Roux, A., Schmitt, B., Bastick, C., Colin, A., Rigolot, É., Bastien, J.-C., Leban, J.-M., & Gardiner, B. (2017b). *Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ?*

DIRECTIVE (UE) 2018/2001 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables (refonte), 2018/2001 (2018).

Eggleston, S., Buendia, L., & 三輪恭子. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: intergovernmental panel on climate change. volume 4 (Agriculture, forestry and other land use)*. The Institute for Global Environmental Strategies.

Epron, D., Plain, C., Lerch, T., & Ranger, J. (2016). Les sols forestiers, puits de méthane : un service écosystémique méconnu. *Revue Forestière Française*, *1*, 313. https://doi.org/10.4267/2042/62129

European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, Agostini, A., Giuntoli, J., Boulamanti, A., & Marelli, L. (2014). *Carbon accounting of forest bioenergy: conclusions and recommendations from a critical literature review.* Publications Office of the European Union. http://dx.publications.europa.eu/10.2788/29442

Gimmi, U., Poulter, B., Wolf, A., Portner, H., Weber, P., & Bürgi, M. (2013). Soil carbon pools in Swiss forests show legacy effects from historic forest litter raking. *Landscape Ecology*, *28*(5), 835–846. https://doi.org/10.1007/s10980-012-9778-4

IGN. (2017). *La forêt plantée en France: Etat des lieux*.

JRC. (2010). *ILCD handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. JRC.

Landmann, G., Augusto, L., Bilger, I., Cacot, E., Deleuze, C., Gosselin, M., & Pousse, N. (2019). *Gestion raisonnée de la récolte de bois énergie. Synthèse* (Projet GERBOISE). ADEME.

Landmann, Guy, & Nivet, C. (2014). *Projet RESOBIO. Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité*. Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt, ADEME, GIP ECOFOR.

Le Moguédec, G., & Dhôte, J.-F. (2012). Fagacées: a tree-centered growth and yield model for sessile oak (Quercus petraea L.) and common beech (Fagus sylvatica L.). *Annals of Forest Science*, *69*(2), 257–269. https://doi.org/10.1007/s13595-011-0157-0

Lemaire, J. (2008). Numéro spécial: sylviculture du châtaignier. *Forêt Entreprise*, *179*.

Levasseur, A., Cavalett, O., Fuglestvedt, J. S., Gasser, T., Johansson, D. J. A., Jørgensen, S. V., Raugei, M., Reisinger, A., Schivley, G., Strømman, A., Tanaka, K., & Cherubini, F. (2016). Enhancing life cycle impact assessment from climate science: Review of recent findings and recommendations for application to LCA. *Ecological Indicators*, *71*, 163–174. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.049

Martel, S., Loustau, D., Achat, D., Picard, O., Moisy, C., Drouineau, S., Maviel, M., Mugica, A., Petroff, A., Husson, H., Maris, C., & Beaussart, X. (2018). *Evaluation de l'effet d'atténuation des forêts de production adaptées au changement climatique : projet EVAFORA* (p. 53). ADEME.
Matthews, R., Sokka, L., Soimakallio, S., Mortimer, N., Rix, J., Schelhaas, M.-J., Jenkins, T., Hogan, G. B. M., Mackie, E., Morris, E., & Randle, T. (2014). *Review of literature on biogenic carbon and life cycle assessment of forest bioenergy. Final Task 1 report*.
Morison, J. I. L., Great Britain, Forest Research, Great Britain, & Forestry Commission. (2012). *Understanding the carbon and greenhouse gas balance of forests in Britain*. Forestry Commission.
Nguyen The, N., Berthelot, A., Charnet, A., & Fauconnier, T. (2008). *Etude comparative sur le fonctionnement biologique des sols dans les cultures ligneuses* (Rapport de projet REGIX).
Pellerin, S., Bamière, L., Launay, C., Martin, R., Angers, D., Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Bellassen, V., Cardinael, R., Cécillon, L., Ceschia, E., Chenu, C., Constantin, J., Darroussin, J., Delacote, P., Delame, N., Gastal, F., Gilbert, D., & Schiavo, M. (2019). *Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif de 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude, INRA (France)*.
Pingoud, K., Skog, K., Martino, D. L., Tonosaki, M., & Xiaoquan, Z. (2006). *IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Agriculture, Forestry and Other Land Uses, Harvested Wood Products* (Vol 4. Chapter 12). IPCC.
Planton, S., Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (2013). *GIEC, 2013: Glossaire.* IPCC.
Valade, A., Bellassen, V., Luyssaert, S., Vallet, P., & Njakou Djomo, S. (2017). *Bilan carbone de la ressource forestiere francaise - Projections du puits de carbone de la filière forêt-bois française et incertitude sur ses déterminants* (p. 66). auto-saisine. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01629845

13. Annexe 13 : Hypothèses considérées pour les modèles utilisés

13.1. Modélisation des stocks de biomasse vivante en forêt

Les scénarios étudiés et les scénarios de référence sont présentés dans la section 2 partie 3 du rapport et portent sur :

- l'exploitation et l'amélioration des taillis en croissance (voir section 3 Figure 58) ;
- la transformation des taillis capitalisés (voir section 3 Figure 59) ;
- la collecte des menus bois/houppier et des souches dans les futaies résineuses (voir section 4 Figure 81 et Figure 82) ;
- la collecte des menus bois en futaie feuillue (voir section 4 Figure 81) ;
- le reboisement des terres en déprise agricole (voir section 5 Figure 97).

L'essence choisie pour la modélisation des taillis est le châtaignier, la futaie résineuse correspond à une futaie de douglas et la futaie feuillue est modélisée comme une futaie de chêne. Les TCR sont assimilés à des taillis à courte rotation d'eucalyptus.

Les modèles de croissance utilisés sont décrits ci-dessous :

Tableau 153 : Modèles de croissance utilisées pour les différentes essences étudiées

Essence	*Modèle de croissance*	*Outil utilisé*
Châtaigner	modèle dendrométrique développé par le CNPF-IDF (Lemaire, 2008).	Excel
Douglas	modèle OASIS (Cailly and Cavaignac 2016).	CAPSIS
Chêne	modèle FAGACEE paramétré en utilisant les itinéraires recommandés par l'ONF (Le Moguédec & Dhôte, 2012)	CAPSIS
Eucalyptus	modèle dendrométrique développé par FCBA (Bouvet, 2013)	Excel

Pour chacun des modèles et des classes de fertilité considérées, les révolutions et l'accroissement en volume sont décrits ci-dessous.

Tableau 154 : Caractéristiques des itinéraires sylvicoles envisagés dans les scénarios de récolte de bois énergie

Itinéraire envisagé	*Scénarios concernés*	*Accroissement moyen (production[159]) sur la révolution (bois fort tige en m³/ha/an)*	*Stock moyen sur la révolution (bois fort tige en m³/ha)*	*Stock maximal (bois fort tige en m³/ha)*	*Révolution (année)*
Taillis de châtaignier de fertilité haute	Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1 Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3	9,9	108,2	197,0	20,0
Taillis de châtaignier de fertilité moyenne	Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2	5,5	110	191	35
Futaie de châtaignier de fertilité haute	Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio	9,1	140,0	300,5	53,0
Futaie de douglas de fertilité moyenne à haute	Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1 Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2 Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3 Sc_FutRes_Exploit_MB_1 Sc_FutRes_Exploit_MB_2 Sc_FutRes_Exploit_MB_3 Sc_FutRes_Exploit_MB_4 Sc_FutRes_Exploit_MB_5 Sc_FutRes_Exploit_Souch_1 Sc_FutRes_Exploit_Souche_2 Sc_FutRes_Exploit_Souche_3 Sc_Deprise_FutRes_label	19	255	597	53
Futaie de douglas de fertilité basse à moyenne	Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4	13	201	406	63
Futaie de chêne de fertilité haute	Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5 Sc_Deprise_FutFeuil_label	9,1	411	611	170
TCR d'eucalyptus	Sc_Deprise_TCR_label Sc_Deprise_TCR_bouleau	21,8	21,8	25	30

Les coefficients d'expansion utilisés dans les modèles Fagacées et Oasis sont les suivants :

Tableau 155 : Coefficients d'expansion, densité et contenu carbone sous CAPSIS

		Résineux	*Feuillus*
Coefficient d'expansion des branches	sans unité	1,3	1,6
Coefficient d'expansion des souches	sans unité	1,3	1,28
Infradensité	kg/m³	370	500
Contenu carbone de la matière sèches	%	50	50

Les coefficients d'expansion sont issus de l'étude (Colin, 2014) et sont similaires à ceux de l'étude (Dhôte et al., 2017a).

Le modèle de croissance du châtaignier utiliser l'équation de Sabatier pour évaluer la biomasse aérienne et l'équation de Cairns pour l'ensemble de la biomasse aérienne et souterraine. L'infradensité considéré est 493 kg/m³.

Pour l'eucalyptus, le modèle considère un coefficient d'expansion des branches de 1,2 et de la biomasse souterraine de 1,3. L'infradensité considérée pour l'eucalyptus est de 515 kg/m³.

La représentativité de ces modèles est présentée en annexe 18.

Le tableau suivant présente les caractéristiques des scénarios de référence pour les scénarios relatifs aux taillis (ces données sont issues de dires d'experts et non pas des modèles de croissance et sont présentées dans des graphes dans la section 2.1.1 de la partie 3 du présent rapport).

[159] La production selon l'IGN correspond à l'accroissement plus le recrutement de jeunes arbres. L'accroissement calculé pour les modèles de croissance peut être assimilé à la production puisque les modèles n'intègrent pas de recrutement.

Tableau 156 : Stocks de carbone de la biomasse aérienne et souterraine pour les scénarios de référence en tC par hectare

	Taillis en croissance		*Taillis capitalisés*		
Temps (ans)	*Référence Taillis (tC/ha) – fertilité haute*	*Référence Taillis (tC/ha) – fertilité basse*	*Référence Taillis équilibre*	*Référence Taillis (-35 %) tC/ha) – fertilité haute*	*Référence Taillis (-50 %)(tC/ha)*
Fertilité	Haute	Basse	Haute	Haute	Haute
0	NA	NA	NA	NA	NA
20	76	42	NA	NA	NA
40	98,8	54,6	NA	NA	NA
53	118	63	118	118	118
73	118	50,4	118	94,4	70,8
93	118	40,32	118	75,52	56,64
113	118	40,32	118	75,52	56,64
120	118	40,32	118	75,52	56,64
140	118	40,32	118	75,52	56,64

Les scénarios de référence des scénarios relatifs à la récolte des menus bois et des souches en futaie résineuse et en futaie feuillue sont modélisés avec le même modèle de croissance que les scénarios étudiés.

Le scénario de référence des scénarios de boisement de terres en déprise agricole correspond au Label bas-carbone qui prévoit une croissance de la biomasse de 1 m³ par an (bois fort tige) en supposant que l'essence était du bouleau (infradensité 512 kg/m³) (CNPF & Ministère de la transition écoloqique et solidaire, 2019).

Un second scénario de référence a été envisagé correspondant à la croissance d'un taillis de bouleau, soit 3 m³ par an (bois fort tige) et en considérant que le taillis était à l'équilibre en atteignant 72 tC/ha.

13.2. Modélisation des stocks de matière organique morte

La variation de stock entre deux années est basée sur la formule suivante ((Pingoud, Skog, Martino, Tonosaki, & Xiaoquan, 2006).

$$\Delta C(i) = C(i+1) - C(i)$$

Où :

i : année ;

C(i) : stock de carbone en début d'année i (en kg eq. CO_2) ;

Pour estimer le stock de carbone, le calcul est basé sur la formule suivante.

$$C(i+1) = e^{-k} \times C(i) + \left[\frac{(1-e^{-k}}{k}\right] \times Inflow(i)$$

Où :

i : année ;

C(i) : stock de carbone en début d'année i (en kg eq. CO_2) ;

k : constante de décomposition issue de la fonction exponentielle décroissante (en année-1) ;

Inflow(i) : flux entrant dans le stock durant l'année i (en kg eq. CO_2 année-1).

Le calcul de la constante k est basé sur la formule suivante.

$$k = \frac{\ln(2)}{HL}$$

Où :

HL : temps de demi-vie.

Le tableau suivant présente les durées de vie de la matière organique morte.

Tableau 157 : Demi-vie de la matière organique morte

Matière organique morte	*Unité*	*Durée correspondant à une dégradation moyenne*	*Durée correspondant à une dégradation forte*	*Durée correspondant à une dégradation faible*
Demi-vie des menus bois	ans	5	3	7
Demi-vie du bois mort feuillu	ans	30	18	42
Demi-vie du bois mort résineux	ans	10	6	14
Durée de vie moyenne des menus bois	ans	7,2	4,3	10,1
Durée de vie moyenne du bois mort feuillu	ans	43,3	26,0	60,6
Durée de vie moyenne du bois mort résineux	ans	14,4	8,6	20,2

Il est considéré que les menus bois sont récoltés à hauteur de 70 % pour les scénarios de récolte des taillis et futaie de châtaignier. Pour les scénarios de récolte des menus bois en futaie feuillue et résineux, il est considéré pour la majorité des scénarios que 100 % des menus bois est récolté à l'exception du scénario Sc_FutRes_Exploit_MB_4.

Dans les scénarios où il est considéré un dessouchage, seule 50 % de la souche est considéré comme extrait.

13.3. Modélisation des stocks dans les produits

Le devenir de la récolte issue des taillis de châtaigner est le suivant pour les scénarios Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1 et Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2 en considérant un scénario à vocation d'abord énergétique :

Tableau 158 : Devenir de la récolte des taillis de châtaigner

Devenir produits bois taillis	*Pourcentage*
Piquet	30 %
Panneaux	0 %
Bois de feu	70 %
Bardage parquet	0 %
Papier	0 %

Le devenir des produits du taillis dans la bibliographie considère plutôt une utilisation majoritairement en matériau (Bourgeois & Sevrin, 2004) et c'est ce qui est modélisé dans la variante matériau Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3 :

Tableau 159 : Devenir de la récolte des taillis de châtaigner variante matériau

Devenir produits bois taillis	*Pourcentage*
Piquet	65 %
Panneaux	0 %
Bois de feu	25 %
Bardage parquet	5 %
Papier	0 %

Le devenir de la récolte issue de la futaie de châtaignier provient également du livre (Bourgeois & Sevrin, 2004) après simplification des débouchés pour les besoins de la modélisation :

Tableau 160 : Devenir de la récolte des différentes éclaircies et de la coupe finale pour la futaie de châtaignier

Devenir produits bois futaie première et deuxième éclaircie	
Piquet	0 %
Panneaux	0 %
Bois de feu	100 %
Bardage parquet	0 %
Papier	0 %

Devenir produits bois futaie troisième éclaircie	
Piquet	0 %
Panneaux	0 %
Bois de feu	35 %
Bardage parquet	65 %
Papier	0 %

Devenir produits bois futaie/ taillis coupe finale	
Piquet	0 %
Panneaux	0 %
Bois de feu	9 %
Bardage parquet	91 %
Papier	0 %

On peut observer une augmentation de la récolte de bois d'œuvre au fur et à mesure des éclaircies.

Le devenir des produits de la futaie de douglas et de futaie de chêne correspond au devenir moyen de la récolte décrit respectivement dans les annexes 10 et 11 du rapport d'étude du projet GESFOR (Cornillier, Fortin, Vial, Cailly, & Martel, 2018) :

- Pour le douglas, sur l'ensemble de la révolution, 39 % est utilisé en bois énergie, 24 % en construction, 17 % en emballage, 9 % en papier, 5 % en ameublement et 6 % en utilisation interne à la filière (séchage des sciages ou des particules et copeaux pour les panneaux). Il faut noter qu'une partie importante du bois de douglas utilisé en construction est constitué de panneaux de process (OSB, panneaux de particules, panneaux de fibre) produits à partir de bois d'industrie et non de bois d'œuvre.
- Pour le chêne, sur l'ensemble de la révolution, 62 % en énergie, 11 % en construction, 10 % en ameublement, 8 % en papier, 4 % en emballage et 4 % en énergie interne à la filière.

Le devenir de la récolte de TCR est entièrement dédié à l'énergie.

Les variations de stocks sont calculées en utilisant les formules décrites dans le paragraphe 13.2. Les durées de vie des différents produits sont décrites dans les tableaux suivants :

Tableau 161 : Durée de vie des produits issus de la récolte des taillis et futaies de châtaignier

Demi-vie produits bois	*Demi-vie (ans)*	*Durée de vie moyenne (ans)*
Sciages	35	50,5
Panneaux	25	36,1
Papier	2	2,9
Piquet de vigne	10,3972	15
Energie	0,14	0,2

Tableau 162 : Durée de vie des produits issus de la récolte des futaies feuillues et résineuses

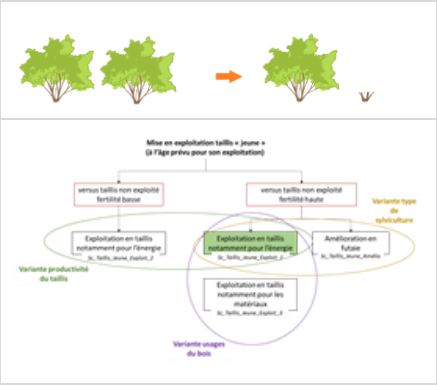
Demi-vie produits bois	*Demi-vie (ans)*	*Durée de vie moyenne (ans)*
Papier	7	10,1
Emballage	3	4,3
Ameublement	10	14,4
Agencement - menuiserie	15	21,6
Structure	50	72,1
Parquet lambris	30	43,3
Energie	0,2	0,3

14. Annexe 14 : Description détaillée des scénarios

Pour chacun des scénarios, sont présentés pour les trois horizons de temps considérés :

- La récolte de bois par hectare et par hectare et par an en volume total et en masse de carbone,
- L'accroissement par hectare en volume total et en masse de carbone,
- Les stocks moyens pour les différents compartiments en volume total et en masse de carbone.

14.1. Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1



Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1 : Mise en exploitation d'un taillis

- Scénario de référence :
  - Taillis de 20 ans qui continue sa croissance à un rythme plus faible en fertilité haute (3,14 m³/ha/an) jusqu'à arriver à un stock maximal de 300 m³/ha (bois fort tige) puis subir un dépérissement de 35 % jusqu'à un niveau d'équilibre à 194 m³/ha.
- Scénario projet :
  - Exploitation en taillis.
  - Fertilité haute - production moyenne (bois fort tige) : 10 m³/ha/an.
  - Type de récolte : bois fort et 70 % de menus bois.
  - Durée de révolution : 20 ans.
  - Répartition de l'usage du bois : 70 % énergie, 30 % matériau.

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 20 ans.

Tableau 163 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1

	Unité	Scénario projet : Taillis exploité fertilité haute	Scénario de référence : Taillis fertilité haute
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	228	0
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	449	0
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	1125	0
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	11	0
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	15	0
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	11	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	55,6	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	109,5	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	274,5	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	2,8	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	3,6	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	2,7	0

ACCROISSEMENT en forêt

	Unité	Scénario projet : Taillis exploité fertilité haute	Scénario de référence : Taillis fertilité haute
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	546	409
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	662	461
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	1476	471
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	133	100
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	162	112
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	360	115

STOCKS en forêt - biomasse aérienne

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	113	279
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	98	323
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	113	311
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	27,6	68,1
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	24	79
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	27,5	75,8

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	63	61
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	63	61
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	63	61
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	15,4	15,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	15	15
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	15,4	15,0

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	3,6	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	5,0	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	4,0	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	0,88	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	1,22	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	0,97	0

STOCKS en forêt - total

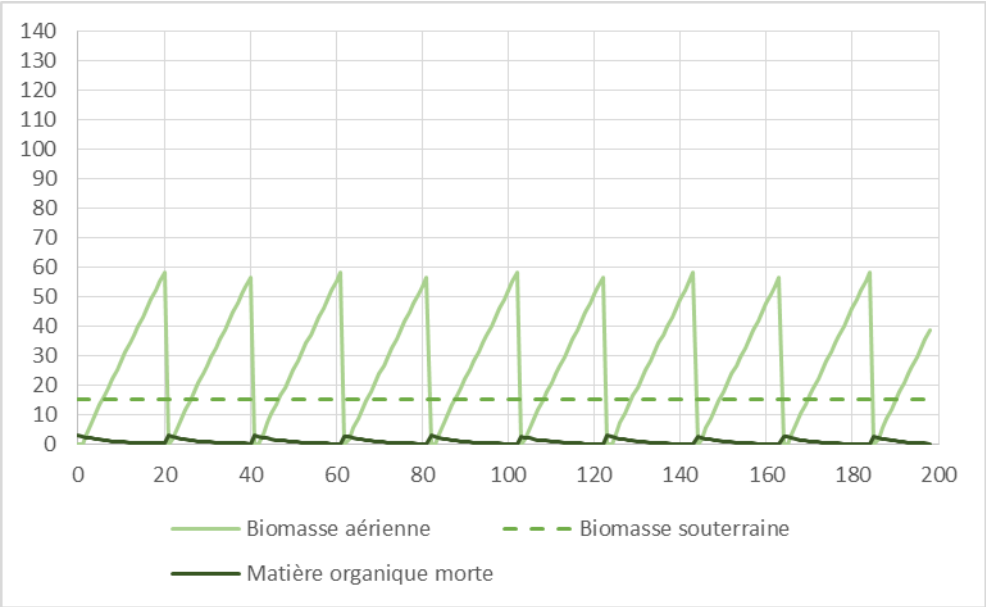
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	180	341
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	166	385
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	180	372
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	44	83
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	40	94
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	44	91

STOCKS dans les produits

	Unité	Scénario projet : Taillis exploité fertilité haute	Scénario de référence : Taillis fertilité haute
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	37	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	33	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	35	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	8,9	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	8,1	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	8,6	0

14.1.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 127 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1

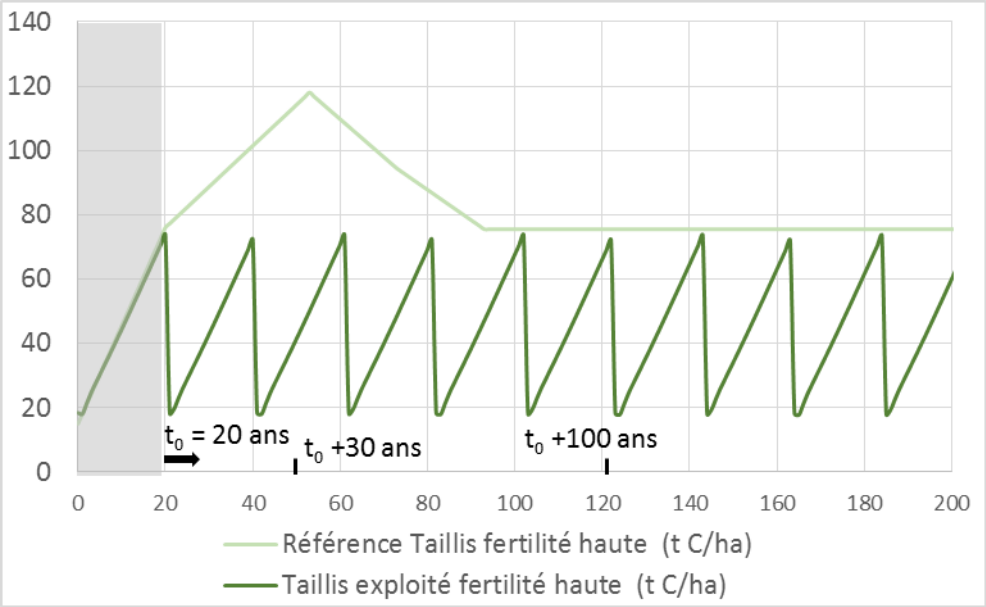


14.1.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Les différents compartiments ne sont pas détaillés pour le scénario de référence (voir description du scénario en Annexe section 13).

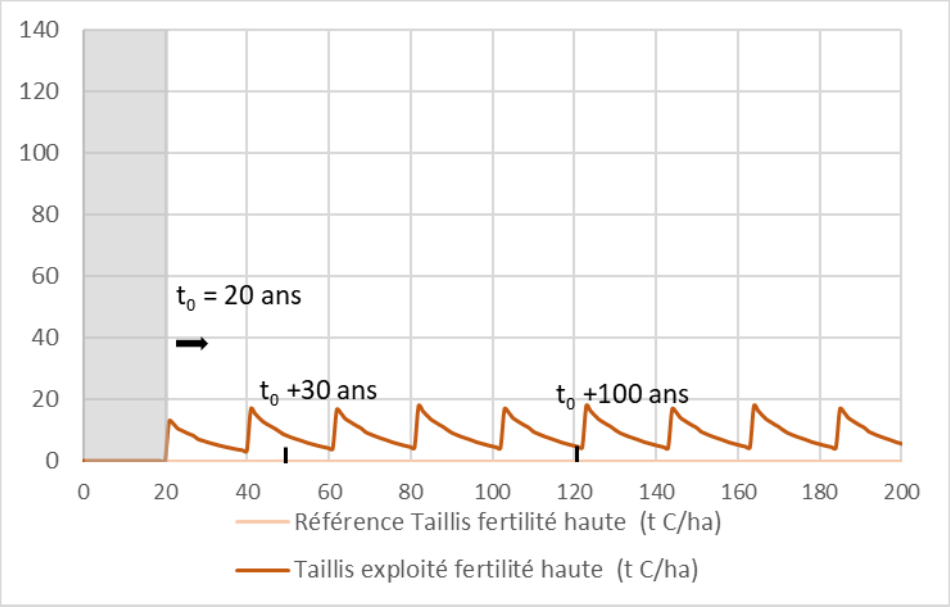
14.1.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 128 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1

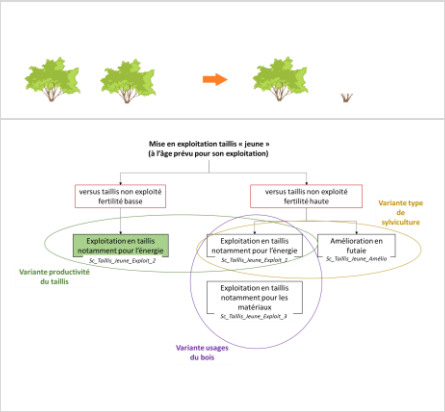


14.1.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 129 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1



14.2. Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2



Taillis_En_Croissance_Exploit_2 : Variante sur la fertilité

- Scénario de référence :
  - Taillis de 35 ans qui continue sa croissance à un rythme plus faible en fertilité moyenne (1,6 m³/ha/an), atteint un stock maximal à 285 m³/ha, (bois fort tige) puis subir un dépérissement de 35 % jusqu'à un niveau d'équilibre à 180 m³/ha.
- Scénario projet :
  - Exploitation en taillis.
  - Fertilité moyenne - production moyenne (bois fort tige) : 5,5 m³/ha/an.
  - Type de récolte : bois fort et 70 % de menus bois.
  - Durée de révolution : 35 ans.
  - Répartition de l'usage du bois : 70 % énergie, 30 % matériau

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 35 ans.

Tableau 164 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2

	Unité	Scénario projet : Taillis exploité fertilité moyenne	Scénario de référence : Taillis fertilité moyenne
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	221	0
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	221	0
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	660	0
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	6,33	0
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	7,38	0
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	6,60	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	54,0	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	54,0	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	161	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	1,54	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	1,80	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	1,61	0
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	538	389
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	513	377
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	970	448
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	131	94,9
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	125	92,0
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	237	109
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			

	Unité	Scénario projet : Taillis exploité fertilité moyenne	Scénario de référence : Taillis fertilité moyenne
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	113	280
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	99,2	278
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	112	326
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	27,6	68,3
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	24,2	67,9
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	27,3	79,6

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	61,9	61,5
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	61,9	61,5
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	61,9	61,5
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	15,1	15,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	15,1	15,0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	15,1	15,0

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	3,13	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	3,18	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	2,98	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	0,764	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	0,776	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	0,728	0

STOCKS en forêt - total

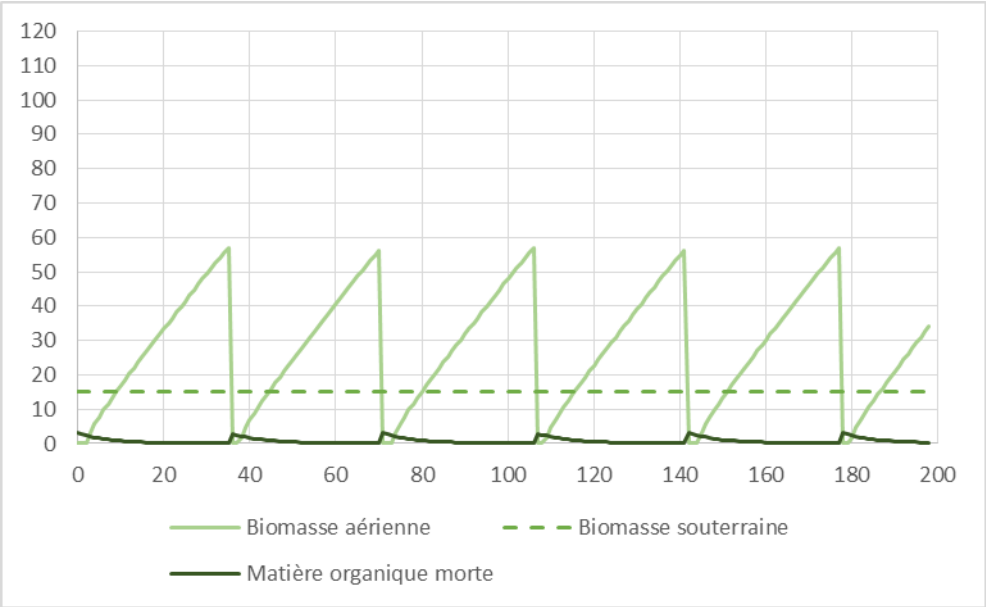
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	178	341
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	164	340
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	177	388
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	43,4	83,3
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	40,1	82,9
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	43,1	94,6

STOCKS dans les produits

	Unité	Scénario projet : Taillis exploité fertilité moyenne	Scénario de référence : Taillis fertilité moyenne
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	23,6	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	24,5	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	23,5	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	5,77	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	5,99	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	5,72	0

14.2.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 130 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2

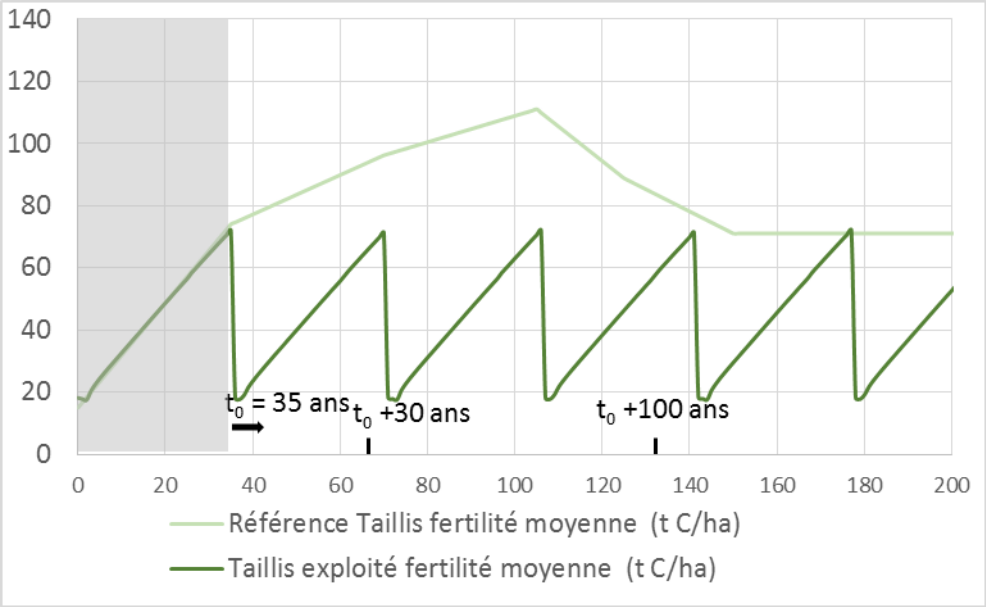


14.2.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Les différents compartiments ne sont pas détaillés pour le scénario de référence (voir description du scénario en Annexe section 13).

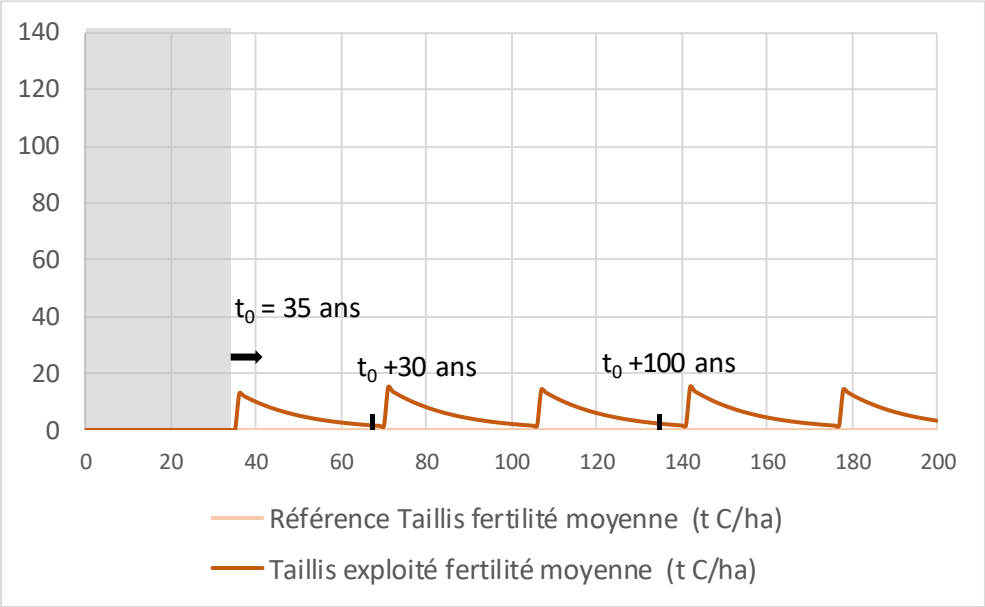
14.2.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 131 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2

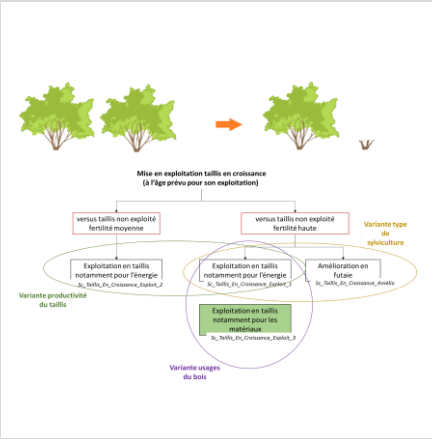


14.2.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 132 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2



14.3. Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3



Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3 : Variante sur l'utilisation du bois récolté

- Scénario de référence :
  - Taillis de 20 ans qui continue sa croissance à un rythme plus faible en fertilité haute (3,14 m³/ha/an) jusqu'à arriver à un stock maximal de 300 m³/ha (bois fort tige) puis subir un dépérissement de 35 % jusqu'à un niveau d'équilibre à 194 m³/ha.
- Scénario projet :
  - Exploitation en taillis.
  - Fertilité haute - production moyenne (bois fort tige) : 10 m³/ha/an.
  - Durée de révolution : 20 ans.
  - Type de récolte : bois fort et 70 % de menus bois.
  - Répartition de l'usage du bois : 30 % énergie, 70 % matériau (65 % piquets et 5 % parquet).

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 20 ans.

Tableau 165 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3

	Unité	Taillis exploité variante matériau fertilité haute	Référence Taillis fertilité haute
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	228	0
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	449	0
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	1 125	0
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	11,4	0
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	15,0	0
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	11,2	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	55,6	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	109	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	274	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	2,78	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	3,65	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	2,74	0
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	546	409

	Unité	Taillis exploité variante matériau fertilité haute	Référence Taillis fertilité haute
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	662	461
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	1 476	471
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	133	99,7
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	162	112
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	360	115

STOCKS en forêt - biomasse aérienne

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	113	279
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	97,8	323
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	113	311
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	27,6	68,1
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	23,9	78,8
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	27,5	75,8

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	63,1	61,5
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	63,1	61,5
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	63,1	61,5
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	15,4	15,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	15,4	15,0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	15,4	15,0

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	3,60	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	5,00	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	3,95	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	0,879	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	1,22	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	0,965	0

STOCKS en forêt - total

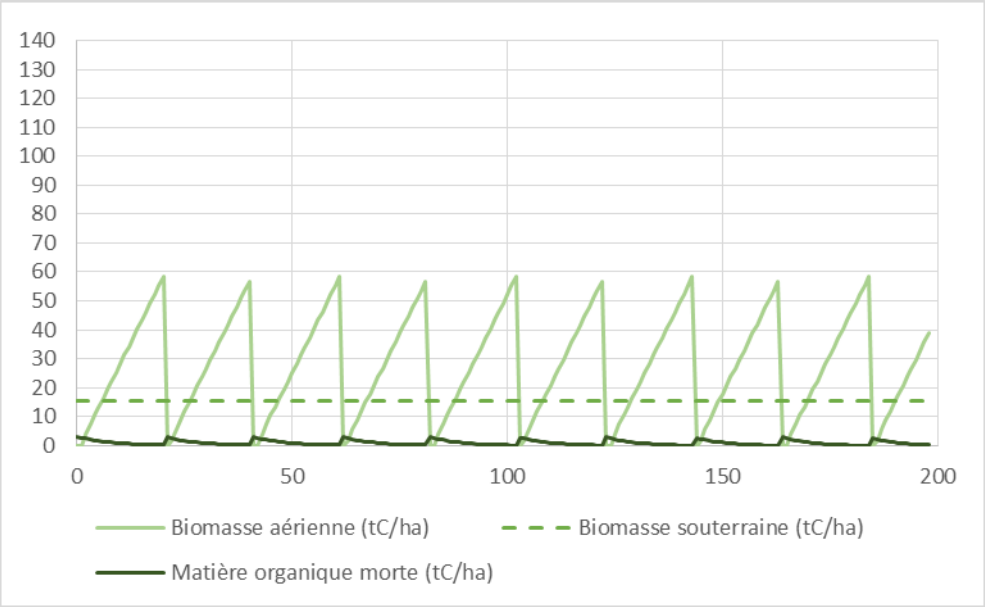
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	180	341
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	166	385
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	180	372
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	43,9	83,1
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	40,5	93,8
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	43,9	90,8

STOCKS dans les produits

	Unité	Taillis exploité variante matériau fertilité haute	Référence Taillis fertilité haute
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	97,7	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	81,0	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	91,5	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	23,8	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	19,8	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	22,3	0

14.3.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 133 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3

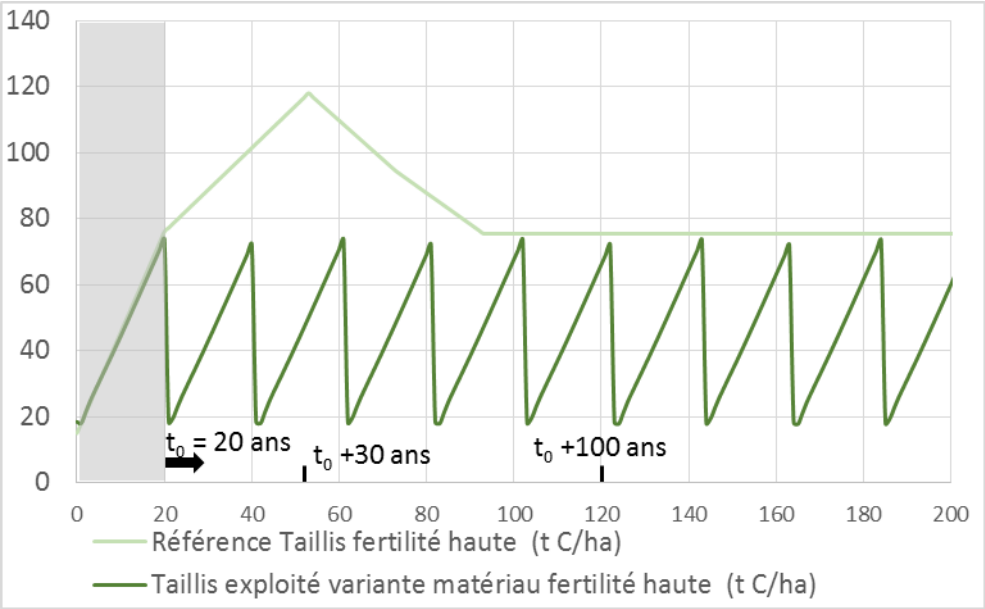


14.3.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Les différents compartiments ne sont pas détaillés pour le scénario de référence (voir description du scénario en Annexe section 13).

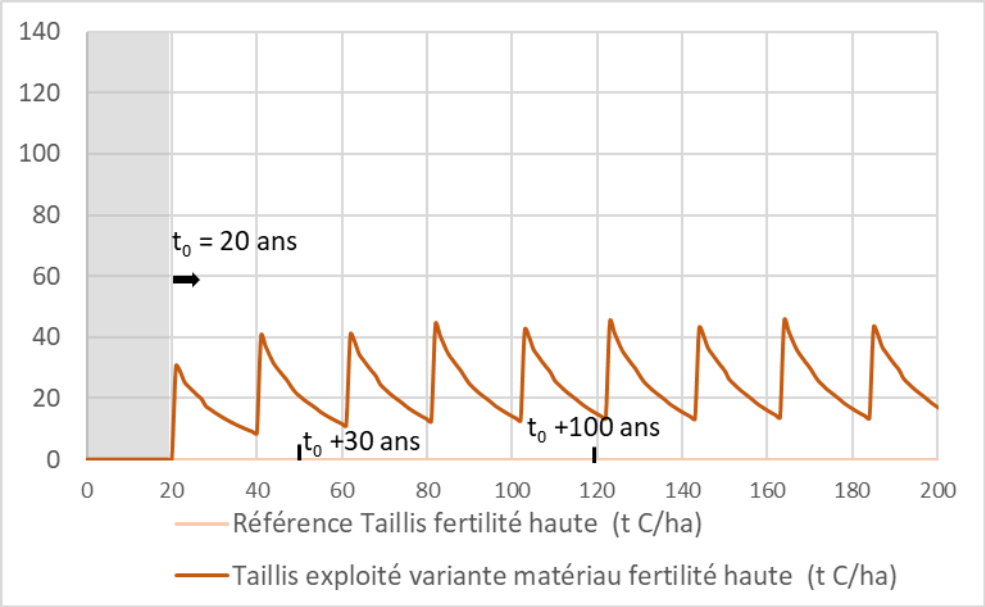
14.3.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 134 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1

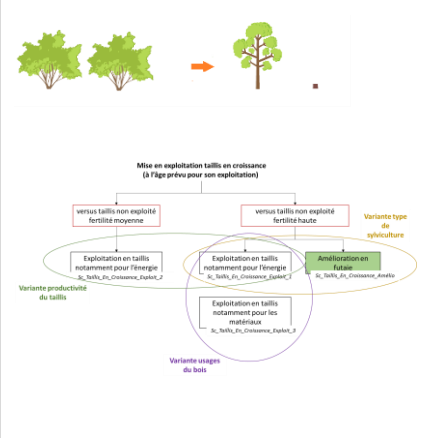


14.3.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 135 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2



14.4. Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio



Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio : Amélioration d'un taillis

- Scénario de référence :
  - Taillis de 20 ans qui continue sa croissance en fertilité haute (3,14 m³/ha/an) jusqu'à arriver à un stock maximal de 300 m³/ha (bois fort tige) puis subit un dépérissement de 35 % jusqu'à un niveau d'équilibre à 194 m³/ha.
- Scénario projet :
  - Amélioration du taillis en futaie.
  - Fertilité haute - production moyenne (bois fort tige) : 9 m³/ha/an.
  - Durée de révolution : 50 ans.
  - Produits récoltés : bois fort et 70 % des menus bois.
  - Utilisation du bois : 100 % en énergie pour 1ère et 2ème éclaircie, 65 % en bardage et 35 % en énergie pour la 3ème éclaircie et 90 % en bardage et 10 % en énergie pour la coupe finale.

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 20 ans.

Tableau 166 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio

	Unité	Taillis fertilité haute amélioration en futaie	Référence Taillis fertilité haute
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	497	0
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	497	0
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	994	0
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	10	0
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	16	0
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	10	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	121,3	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	121,3	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	242,6	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	2,4	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	3,9	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	2,4	0

Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	858	471

	Unité	Taillis fertilité haute amélioration en futaie	Référence Taillis fertilité haute
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	209	115
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	153	112
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	338	115

STOCKS en forêt - biomasse aérienne

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	148	279
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	172	326
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	148	311
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	36,2	68,1
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	42	79
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	36,1	75,8

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	83	61
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	74	61
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	82	61
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	20,3	15,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	18	15
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	19,9	15,0

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	3,7	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	1,2	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	3,7	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	0,9	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	0,3	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	0,9	0

STOCKS en forêt - total

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	235	341
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	247	387
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	233	372

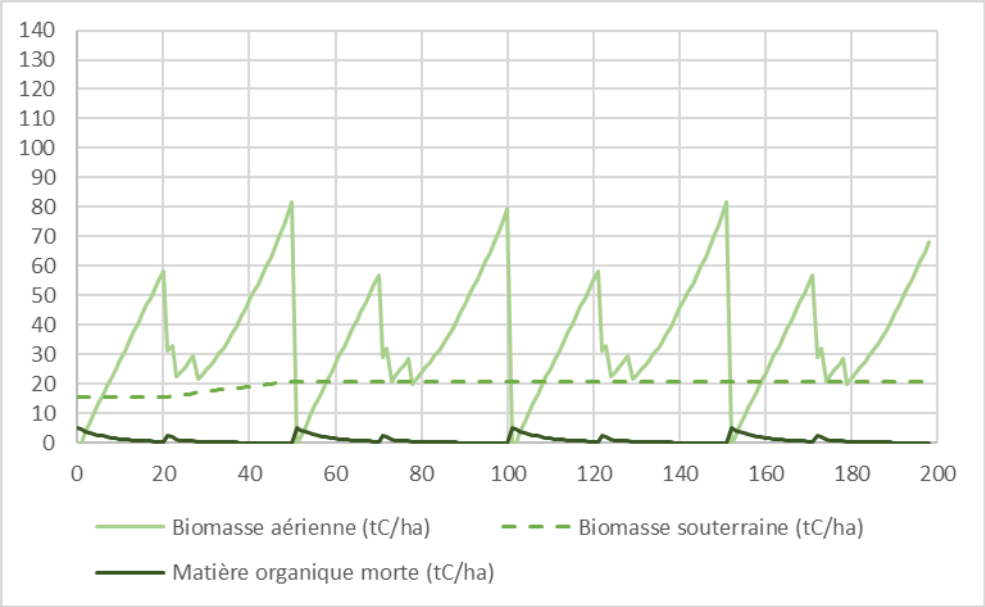
	Unité	Taillis fertilité haute amélioration en futaie	Référence Taillis fertilité haute
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	57	83
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	60	94
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	57	91

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	196	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	17	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	145	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	47,8	0,0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	4	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	35,3	0,0

14.4.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 136 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio

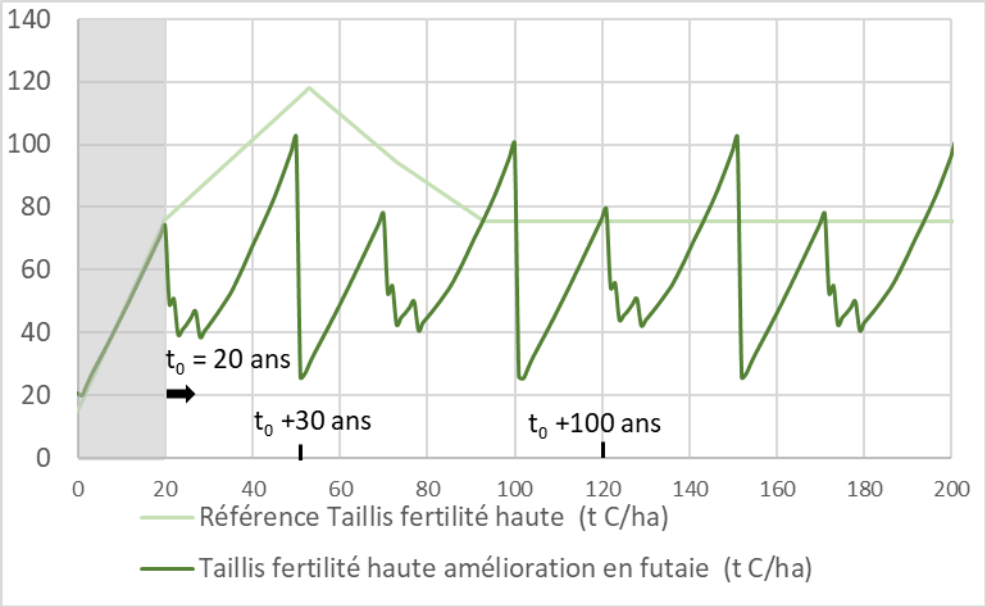


14.4.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Les différents compartiments ne sont pas détaillés pour le scénario de référence (voir description du scénario en Annexe section 13).

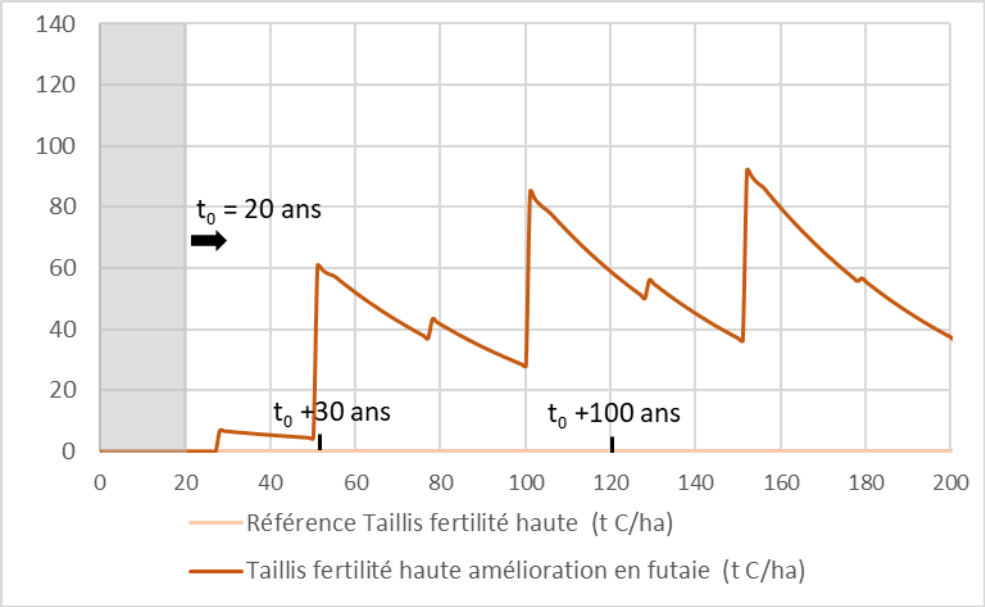
14.4.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 137 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio

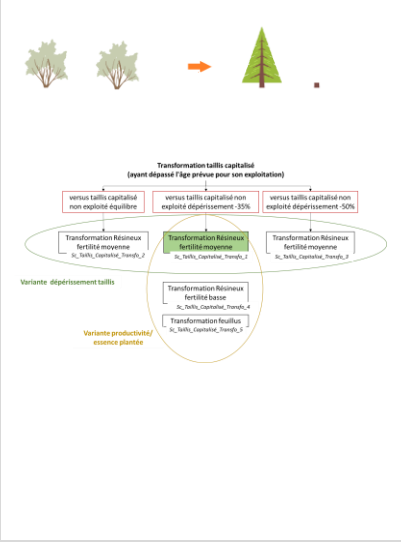


14.4.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 138 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio



14.5. Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1



Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1 : Transformation d'un taillis capitalisé dépérissant (-35 %) en futaie résineuse de douglas de fertilité moyenne à haute

- Scénario de référence :
  - Taillis à 300 m³/ha qui subit un dépérissement (-2,6 m³/ha/an) (bois fort tige) pour attendre un stock à l'équilibre à 194 m³/ha.
- Scénario projet :
  - Exploitation du taillis, arasage des souches puis transformation en futaie de douglas.
  - Durée de la révolution de la futaie de douglas : 53 ans.
  - Fertilité moyenne à haute - Production moyenne (bois fort tige) : 19 m³/ha/an.
  - Produits récoltés : bois fort et 70 % des menus bois.
  - Utilisation du bois :
    - Du taillis : 70 % pour l'énergie et à 30 % pour des piquets.
    - De la plantation résineuse : 39 % en bois énergie, 24 % en construction, 17 % en emballage, 9 % en papier, 5 % en ameublement et 6 % en utilisation interne à la filière (énergie pour le séchage).

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 53 ans.

Tableau 167 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1

	Unité	Futaie douglas, fertilité moyenne	Référence Taillis - 35%
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	860	0
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	532	0
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	1983	0
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	16,2	0
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	17,7	0
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	19,8	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	183,9	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	123,3	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	391,7	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	3,5	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	4,1	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	3,9	0

ACCROISSEMENT en forêt

	Unité	Futaie douglas, fertilité moyenne	Référence Taillis - 35%
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	2205	471
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	1316	471
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	3540	471
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	408	115
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	243	115
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	655	115

STOCKS en forêt - biomasse aérienne

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	306	265
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	150	356
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	299	282
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	56,6	64,6
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	28	87
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	55,2	68,8

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	91	61
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	42	61
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	89	61
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	16,9	15,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	8	15
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	16,4	15,0

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	72,4	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	46,2	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	64,4	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	13,4	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	8,6	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	11,9	0

STOCKS en forêt - total

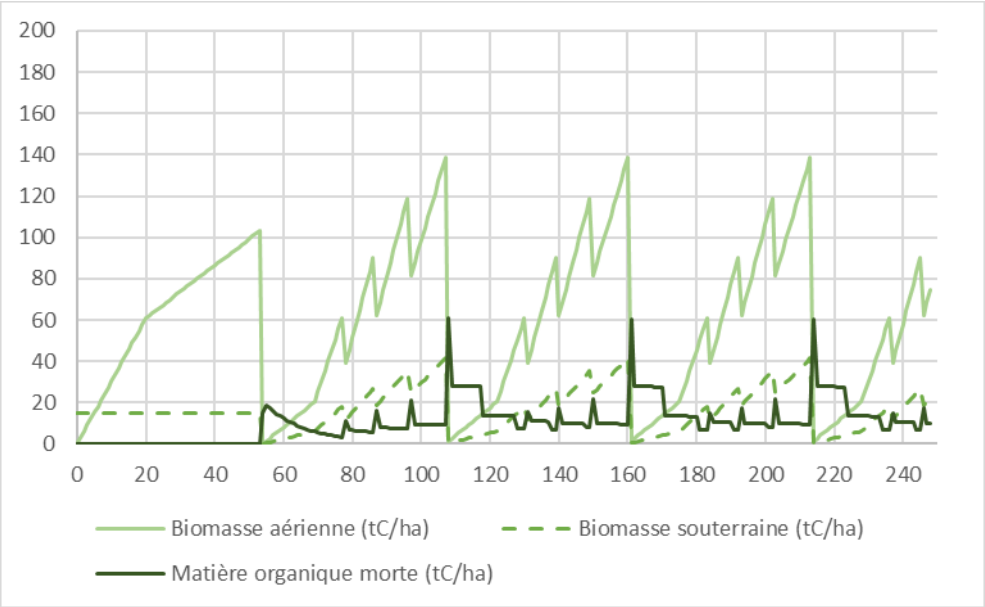
	Unité	Futaie douglas, fertilité moyenne	Référence Taillis - 35%
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	470	326
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	238	417
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	452	344
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	87	80
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	44	102
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	84	84

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	342	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	69	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	235	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	63,3	0,0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	13	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	43,5	0,0

14.5.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 139 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1

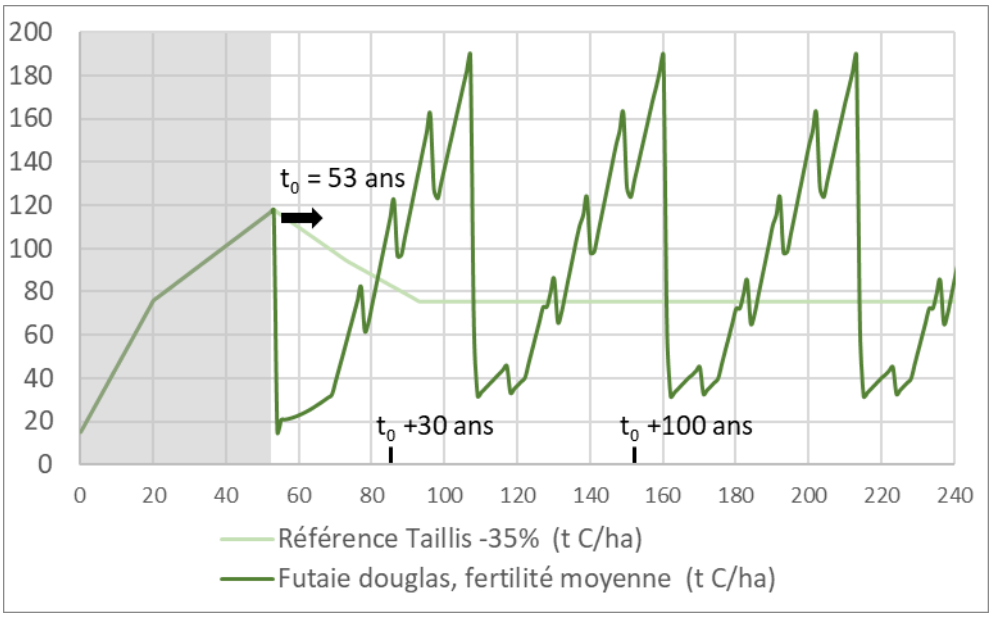


14.5.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Les différents compartiments ne sont pas détaillés pour le scénario de référence (voir description du scénario en Annexe section 13).

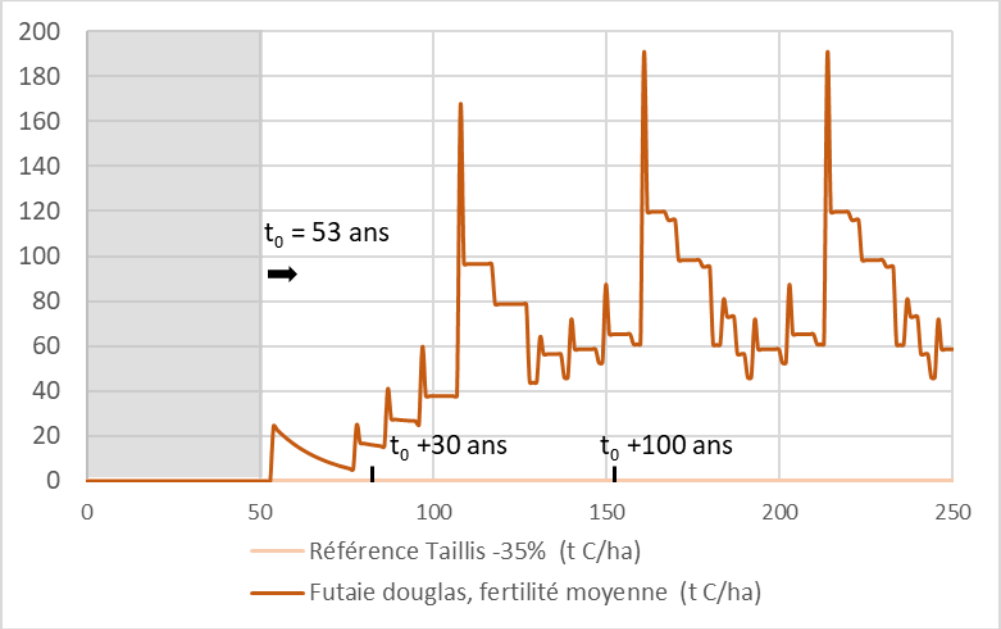
14.5.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 140 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1

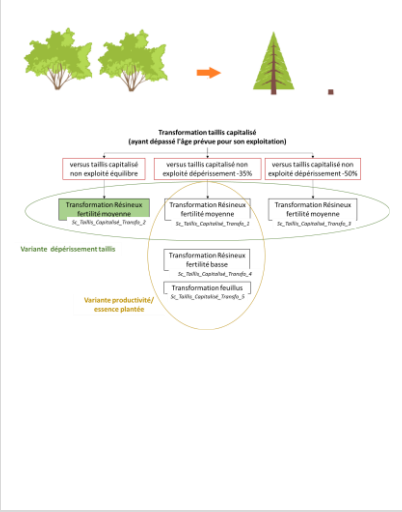


14.5.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 141 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1



14.6. Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2



Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2 : Transformation d'un taillis capitalisé (mature) à l'équilibre en futaie de douglas de fertilité moyenne à haute

- Scénario de référence :
  - Taillis à l'équilibre à 300 m³/ha (bois fort tige).
- Scénario projet :
  - Exploitation du taillis, arasage des souches puis transformation en futaie de douglas.
  - Durée de la révolution de la futaie de douglas : 53 ans.
  - Fertilité moyenne à haute - Production moyenne (bois for tige) : 19 m³/ha/an.
  - Produits récoltés : bois fort et 70 % des menus bois.
  - Utilisation du bois :
    - Du taillis : 70 % pour l'énergie et à 30 % pour des piquets.
    - De la plantation de résineux : 39 % en bois énergie, 24 % en construction, 17 % en emballage, 9 % en papier, 5 % en ameublement et 6 % en utilisation interne à la filière (séchage).

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 53 ans.

Tableau 168 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2

	Unité	Futaie douglas, fertilité moyenne	Référence Taillis équilibre
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	860	0
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	532	0
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	1983	0
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	16,2	0
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	17,7	0
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	19,8	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	183,9	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	123,3	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	391,7	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	3,5	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	4,1	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	3,9	0

ACCROISSEMENT en forêt

	Unité	Futaie douglas, fertilité moyenne	Référence Taillis équilibre
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	2205	471
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	1316	471
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	3540	471
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	408	115
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	243	115
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	655	115

STOCKS en forêt - biomasse aérienne

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	306	422
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	150	422
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	299	422
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	56,6	103,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	28	103
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	55,2	103,0

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	91	61
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	42	61
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	89	61
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	16,9	15,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	8	15
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	16,4	15,0

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	72,4	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	46,2	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	64,4	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	13,4	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	8,6	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	11,9	0

STOCKS en forêt - total

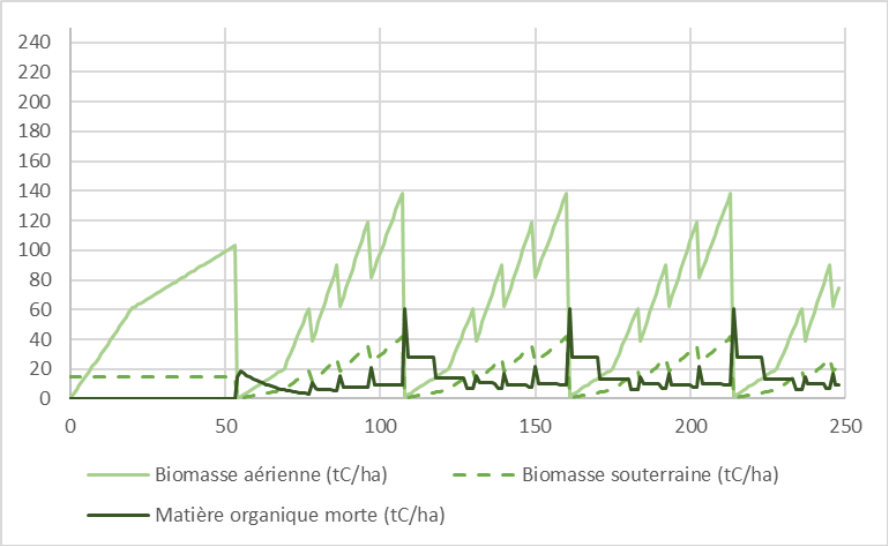
	Unité	Futaie douglas, fertilité moyenne	Référence Taillis équilibre
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	470	484
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	238	484
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	452	484
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	87	118
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	44	118
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	84	118

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	342	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	69	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	235	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	63,3	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	13	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	43,5	0

14.6.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 142 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2

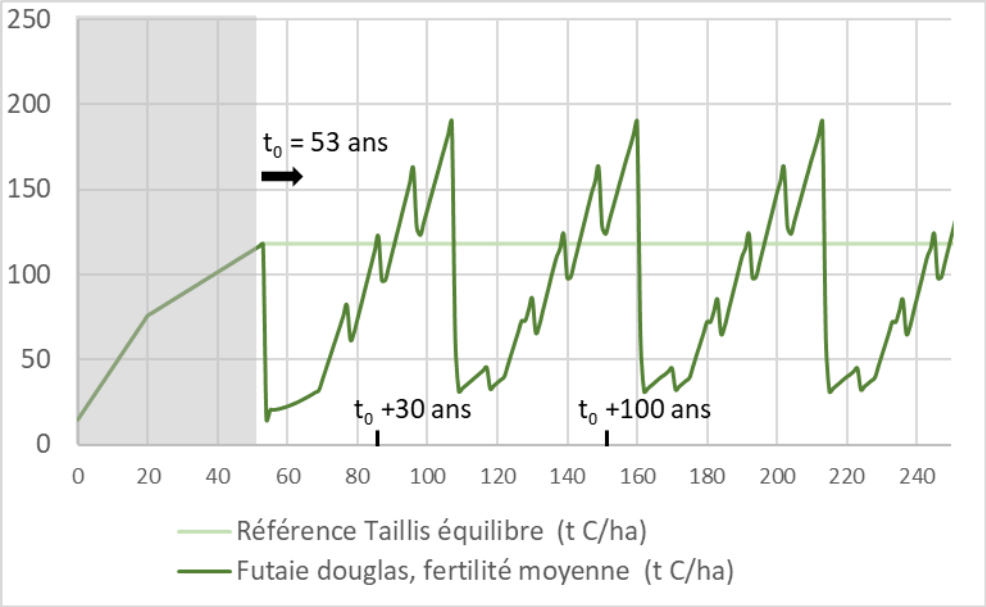


14.6.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Les différents compartiments ne sont pas détaillés pour le scénario de référence (voir description du scénario en Annexe section 13).

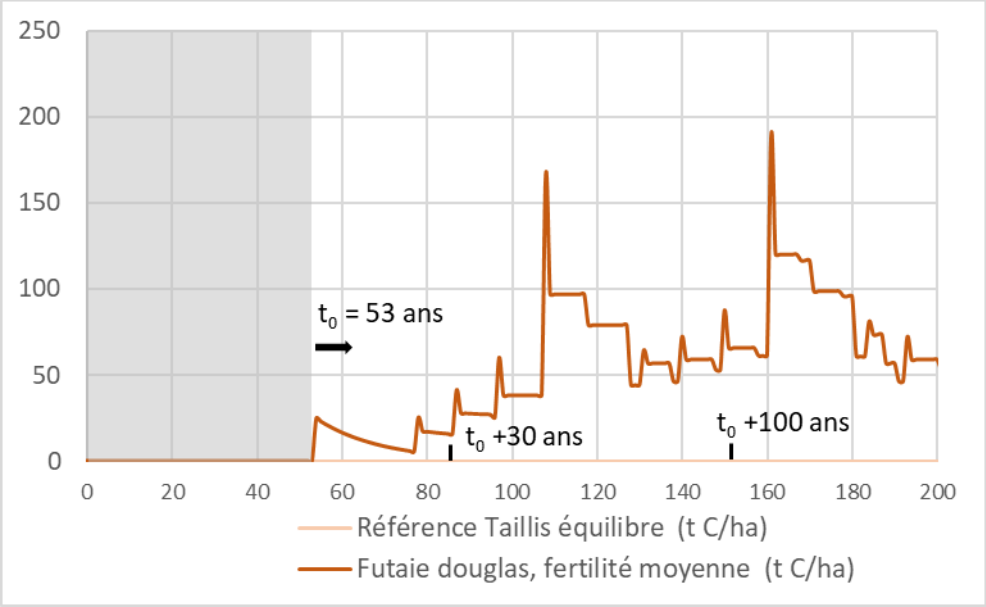
14.6.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 143 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2

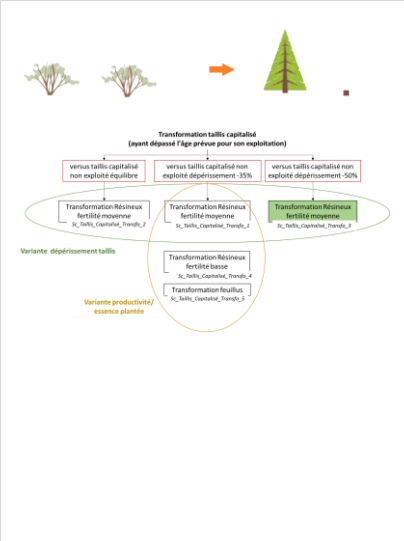


14.6.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 144 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2



14.7. Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3



Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3 : Transformation d'un taillis capitalisé (mature) fortement dépérissant (-50%) en futaie résineuse de fertilité moyenne à haute

- Scénario de référence :
  - Taillis à 300 m³/ha, puis décroit fortement (-4,0 m³/ha/an) (bois fort tige) pour attendre à niveau d'équilibre à 133 m³/ha.
- Scénario projet :
  - Exploitation du taillis, arasage des souches puis transformation en futaie de douglas.
  - Durée de la révolution de la futaie de douglas : 53 ans.
  - Fertilité moyenne à haute - Production moyenne (bois fort tige) : 19 m³/ha/an.
  - Produits récoltés : bois fort et 70 % des menus bois.
  - Utilisation du bois :
    - Du taillis : 70 % pour l'énergie et à 30 % pour des piquets.
    - De la plantation de résineux : 39 % en bois énergie, 24 % en construction, 17 % en emballage, 9 % en papier, 5 % en ameublement et 6 % en utilisation interne à la filière (séchage).

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 53 ans.

Tableau 169 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3

	Unité	Futaie douglas, fertilité moyenne	Référence Taillis - 50%
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	860	0
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	532	0
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	1983	0
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	16,2	0
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	17,7	0
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	19,8	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	183,9	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	123,3	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	391,7	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	3,5	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	4,1	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	3,9	0

ACCROISSEMENT en forêt

	Unité	Futaie douglas, fertilité moyenne	Référence Taillis - 50%
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	2205	471
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	1316	471
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	3540	471
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	408	115
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	243	115
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	655	115

STOCKS en forêt - biomasse aérienne

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	306	190
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	150	295
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	299	209
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	56,6	46,3
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	28	72
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	55,2	51,0

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	91	61
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	42	61
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	89	61
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	16,9	15,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	8	15
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	16,4	15,0

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	72,4	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	46,2	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	64,4	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	13,4	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	8,6	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	11,9	0

STOCKS en forêt - total

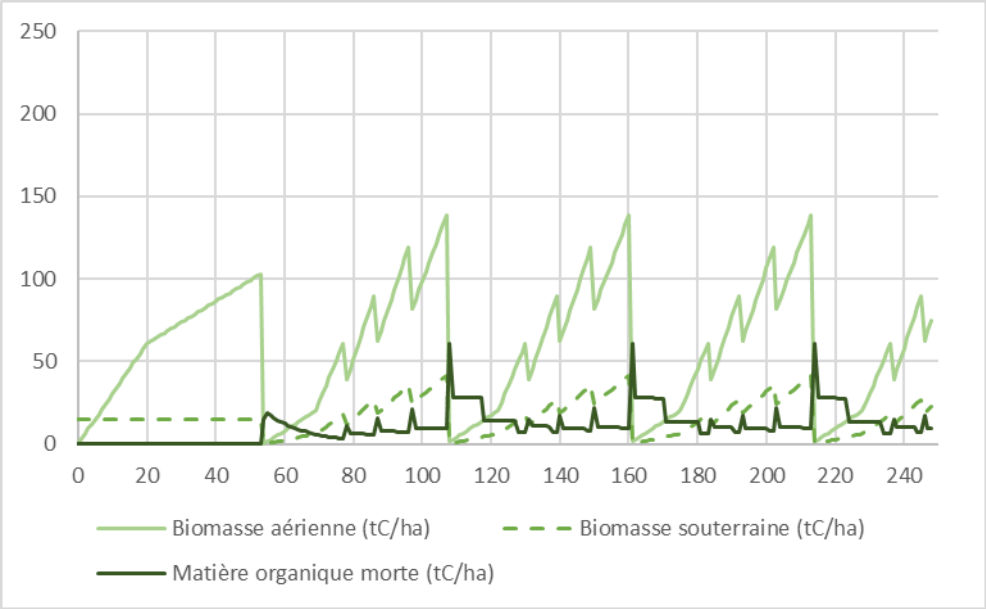
	Unité	Futaie douglas, fertilité moyenne	Référence Taillis - 50%
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	470	251
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	238	357
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	452	271
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	87	61
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	44	87
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	84	66

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	342	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	69	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	235	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	63,3	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	13	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	43,5	0

14.7.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 145 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3

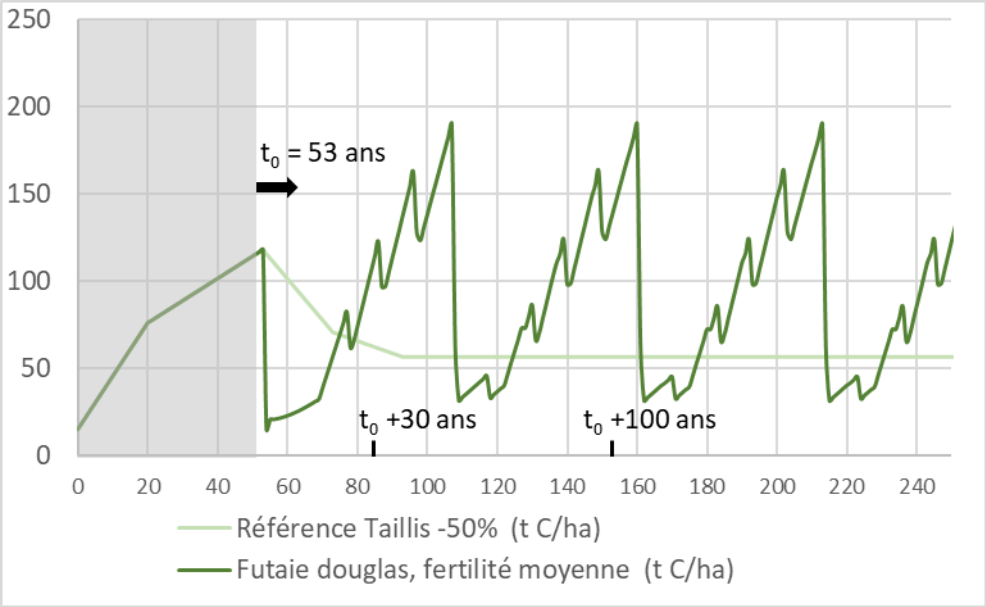


14.7.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Les différents compartiments ne sont pas détaillés pour le scénario de référence (voir description du scénario en Annexe section 13).

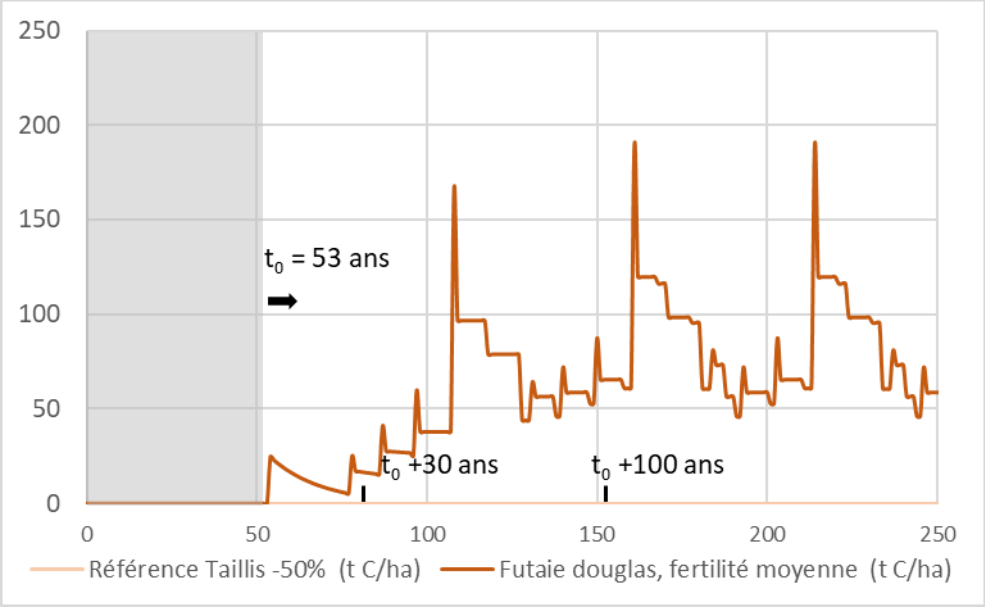
14.7.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 146 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3

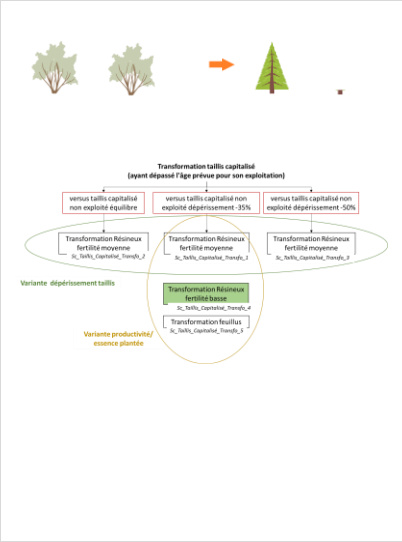


14.7.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 147 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3



14.8. Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4



Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4 : Transformation d'un taillis capitalisé (mature) dépérissant (-35 %) en futaie résineuse douglas de fertilité basse à moyenne

- Scénario de référence :
  - Taillis à 300 m³/ha qui subit un dépérissement (-2,6 m³/ha/an) (bois fort tige) pour attendre un stock à l'équilibre à 194 m³/ha.
- Scénario projet :
  - Exploitation du taillis, arasage des souches puis transformation en futaie de douglas.
  - Durée de révolution de la futaie de douglas : 63 ans.
  - Fertilité basse à moyenne - Production moyenne (bois fort tige) : 13 m³/ha/an.
  - Produits récoltés : bois fort et 70 % des menus bois.
  - Utilisation du bois :
    - Du taillis : 70 % pour l'énergie et à 30 % pour des piquets.
    - De la plantation de résineux : 39 % en bois énergie, 24 % en construction, 17 % en emballage, 9 % en papier, 5 % en ameublement et 6 % en utilisation interne à la filière (séchage).

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 63 ans.

Tableau 170 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4

	Unité	Futaie douglas, fertilité basse	Référence Taillis - 35%
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	869	0
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	512	0
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	1536	0
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	13,8	0
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	17,1	0
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	15,4	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	185,7	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	119,6	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	309,1	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	2,9	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	4,0	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	3,1	0
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	1930	471
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	1089	471
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2585	471
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	357	115
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	202	115
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	478	115
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	255	265
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	113	356
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	222	282

	Unité	Futaie douglas, fertilité basse	Référence Taillis - 35%
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	47,2	64,6
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	21	87
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	41,1	68,8

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	76	61
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	31	61
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	66	61
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	14,1	15,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	6	15
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	12,2	15,0

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	54,6	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	43,8	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	50,9	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	10,1	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	8,1	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	9,4	0

STOCKS en forêt - total

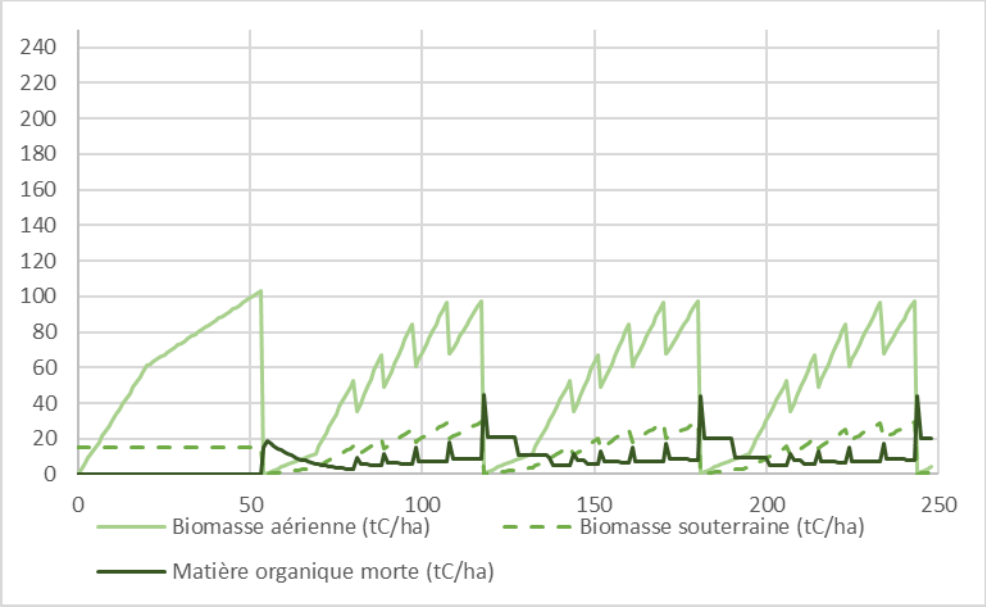
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	386	326
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	188	417
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	339	344
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	71	80
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	35	102
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	63	84

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	242	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	63	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	174	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	44,8	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	12	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	32,2	0

14.8.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 148 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4

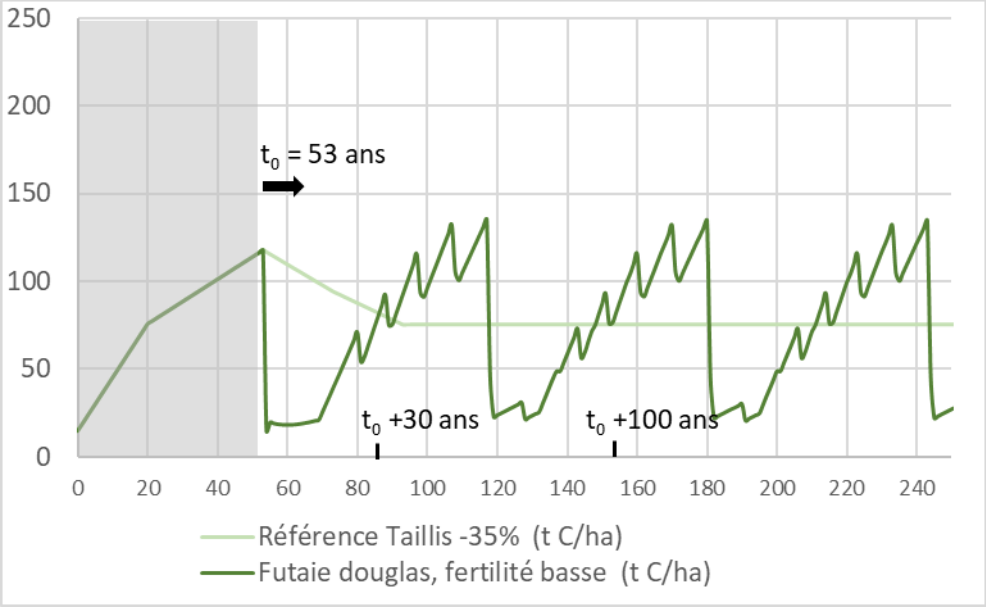


14.8.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Les différents compartiments ne sont pas détaillés pour le scénario de référence (voir description du scénario en Annexe section 13).

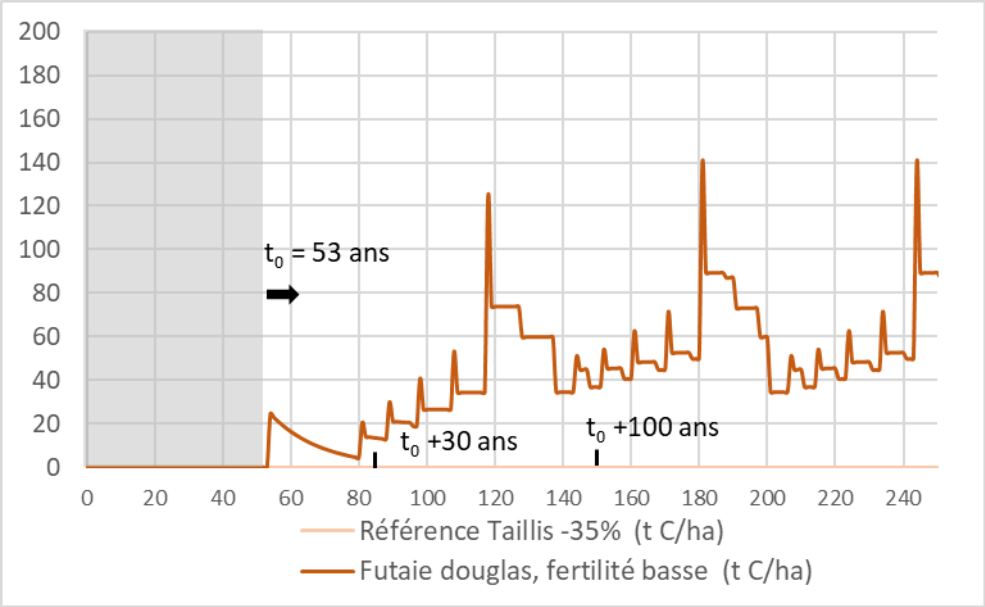
14.8.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 149 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4

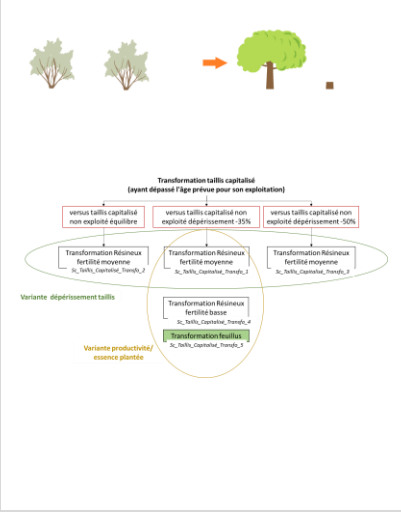


14.8.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 150 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4



14.9. Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5



Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5 : Transformation d'un taillis capitalisé (mature) dépérissant (-35 %) en futaie de feuillue

- Scénario de référence :
  - Taillis à 300 m³/ha qui subit un dépérissement (-2,6 m³/ha/an) (bois fort tige) pour attendre un stock à l'équilibre à 194 m³/ha.
- Scénario projet :
  - Exploitation du taillis puis transformation en futaie feuillue.
  - Durée de révolution de la futaie feuillue : 170 ans.
  - Fertilité haute - Production moyenne (bois fort tige) : 9 m³/ha/an.
  - Produits récoltés : bois fort et 70 % des menus bois.
  - Utilisation du bois :
    - Du taillis : 70 % pour l'énergie et à 30 % pour des piquets.
    - De la plantation de feuillus : 62 % en énergie, 11 % en construction, 10 % en ameublement, 8 % en papier, 4 % en emballage et 4 % en énergie interne à la filière (séchage). 70 % des menus bois sont récoltés pour l'énergie.

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 53 ans.

Tableau 171 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5

	Unité	Futaie feuillue	Référence Taillis -35%
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	2315	0
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	479	0
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	1126	0
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	13,6	0
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	16,0	0
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	11,3	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	576,2	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	117,2	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	279,1	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	3,4	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	3,9	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	2,8	0
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	3296	471
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	973	471
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2453	471
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	824	115
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	243	115
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	613	115
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	444	265
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	110	356
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	387	282

	Unité	Futaie feuillue	Référence Taillis -35%
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	110,9	64,6
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	28	87
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	96,8	68,8

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	124	61
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	29	61
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	108	61
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	31,0	15,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	7	15
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	27,0	15,0

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	126,4	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	43,7	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	82,6	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	31,6	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	10,9	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	20,6	0

STOCKS en forêt - total

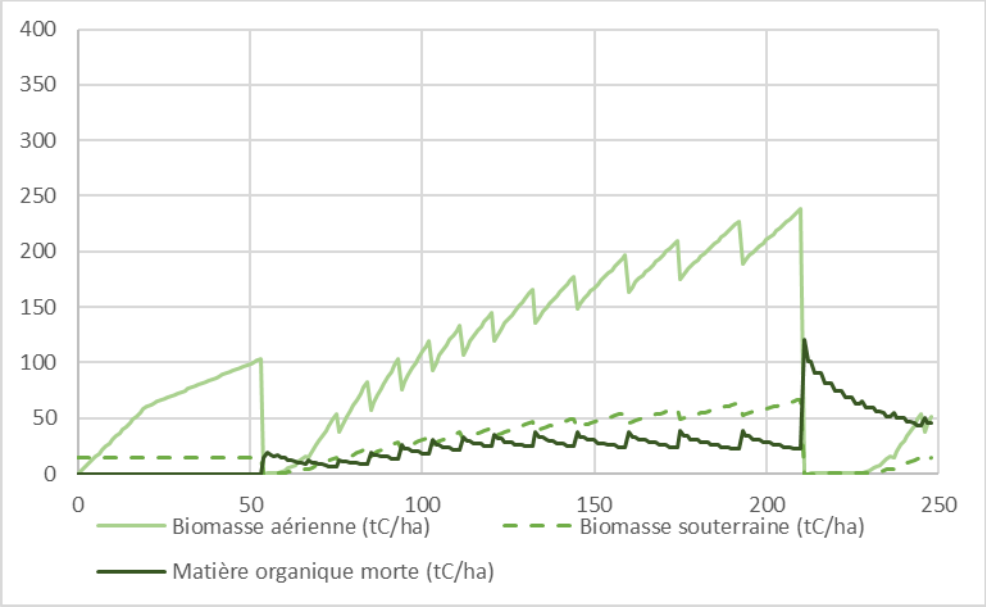
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	694	326
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	183	417
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	578	344
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	174	80
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	46	102
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	144	84

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	115	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	52	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	66	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	28,7	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	13	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	16,5	0

14.9.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 151 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5

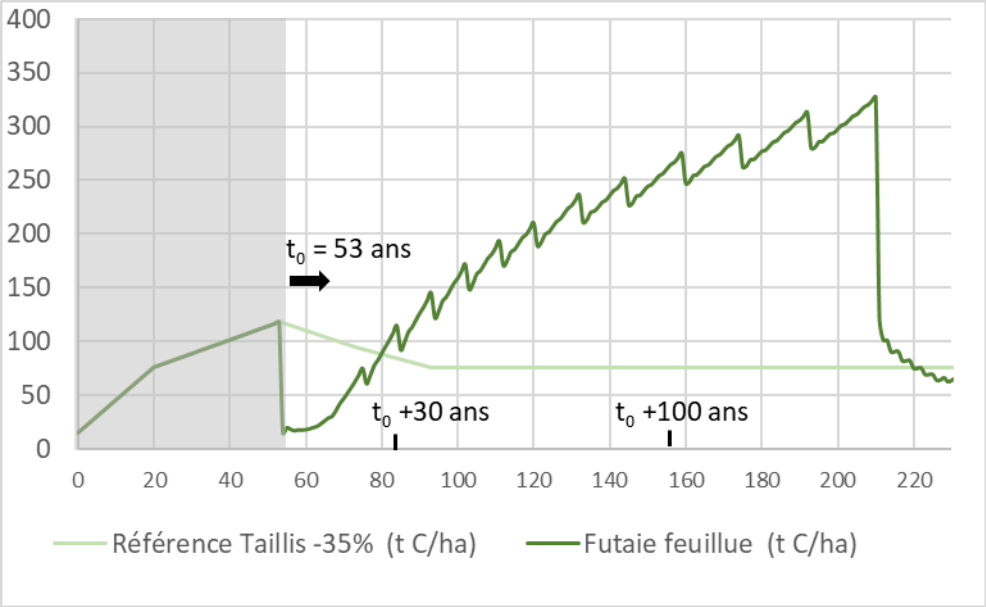


14.9.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Les différents compartiments ne sont pas détaillés pour le scénario de référence (voir description du scénario en Annexe section 13).

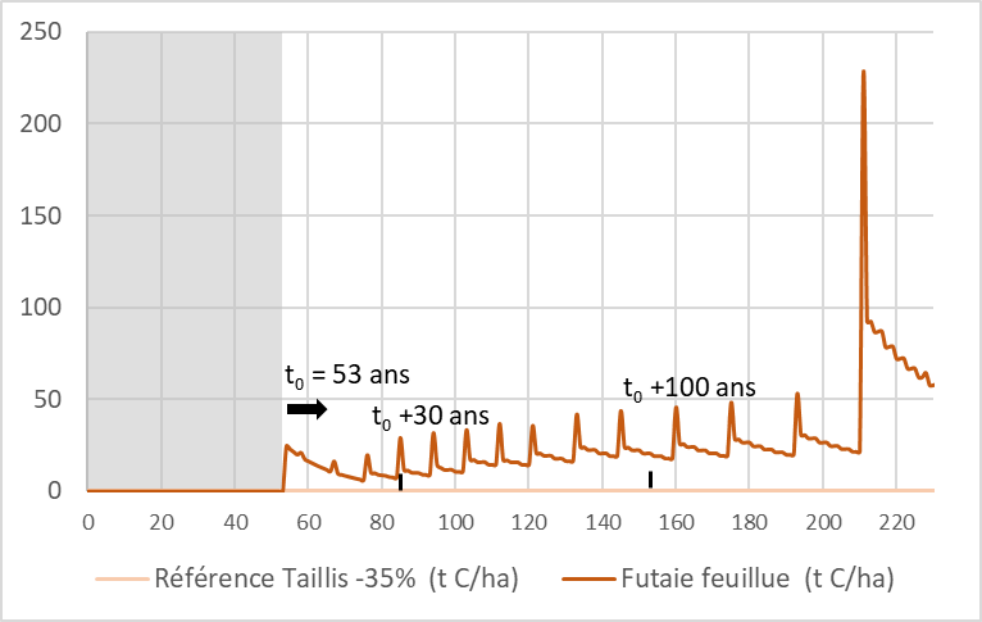
14.9.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 152 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5

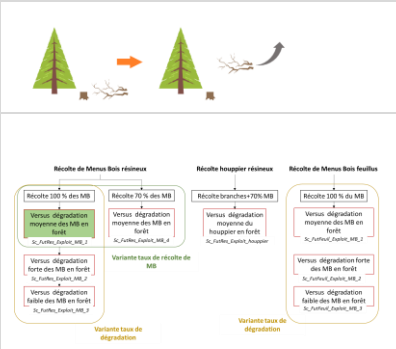


14.9.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 153 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5



14.10. Sc_FutRes_Exploit_MB_1



Sc_FutRes_Exploit_MB_1 : Récolte de 100 % des menus bois

- Scénario de référence :
  - Les menus bois ne sont pas récoltés et se dégradent en forêt avec une demi-vie de 5 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 100 % menus bois en éclaircie et en coupe rase d'une futaie de résineux (290 m³ de MB récoltés par ha à chaque révolution de 53 ans).
  - Utilisation des MB en énergie.

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 20 ans.

Tableau 172 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_1

	Unité	Futaie résineuse, récolte de 100% des MB	Futaie résineuse, non récolte des MB
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	1261	967
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	486	370
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2503	1913
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	24	18
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	16	12
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	25	19
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	225,4	172,7
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	86,8	66,1
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	447,2	341,9
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	4,3	3,3
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	2,9	2,2
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	4,5	3,4
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	2062	2062
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	1630	1630
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	3508	3508
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	368	368
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	291	291
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	627	627
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	335	335
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	480	480
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	346	346
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	59,9	59,9

	Unité	Futaie résineuse, récolte de 100% des MB	Futaie résineuse, non récolte des MB
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	86	86
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	61,9	61,9

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	101	101
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	144	144
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	104	104
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	18,0	18,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	26	26
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	18,6	18,6

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	103	142
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	35	48
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	70	93
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	18,4	25,3
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	6	9
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	12,5	16,6

STOCKS en forêt - total

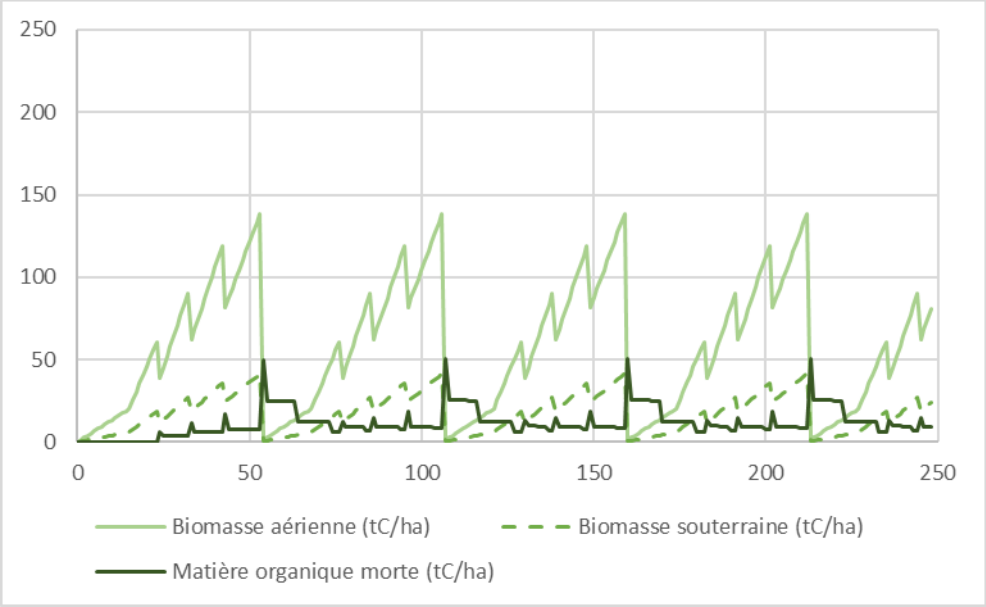
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	539	577
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	659	672
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	520	543
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	96	103
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	118	120
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	93	97

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	389	389
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	141	136
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	356	350
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	69,5	69,5
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	25	24
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	63,7	62,6

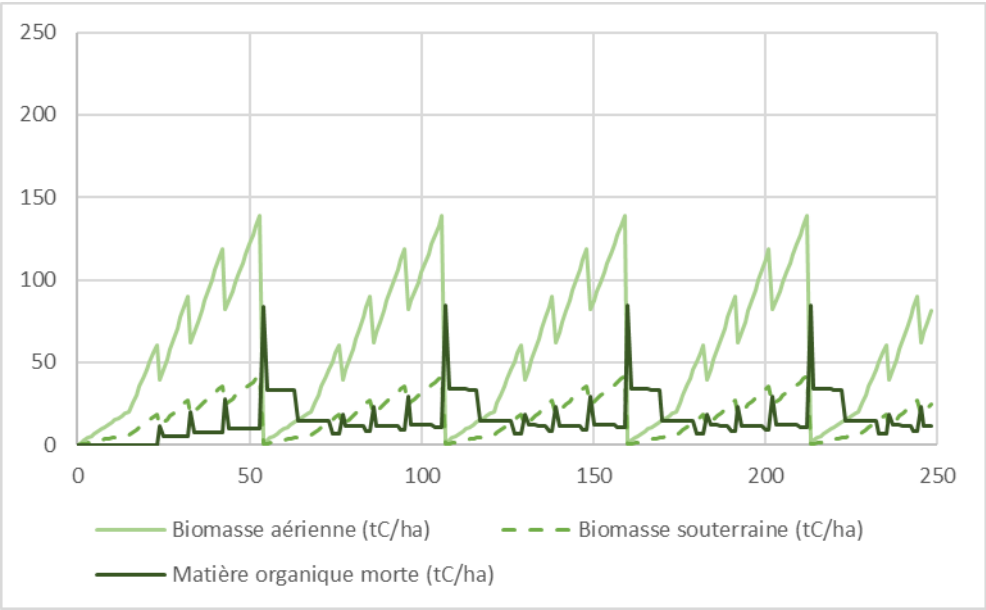
14.10.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 154 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutRes_Exploit_MB_1



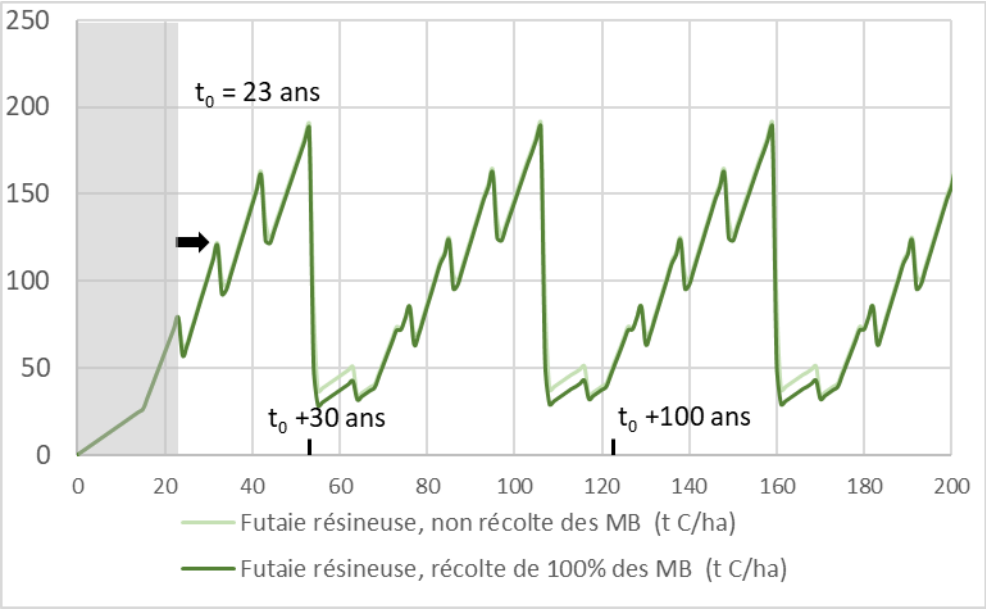
14.10.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 155 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_1



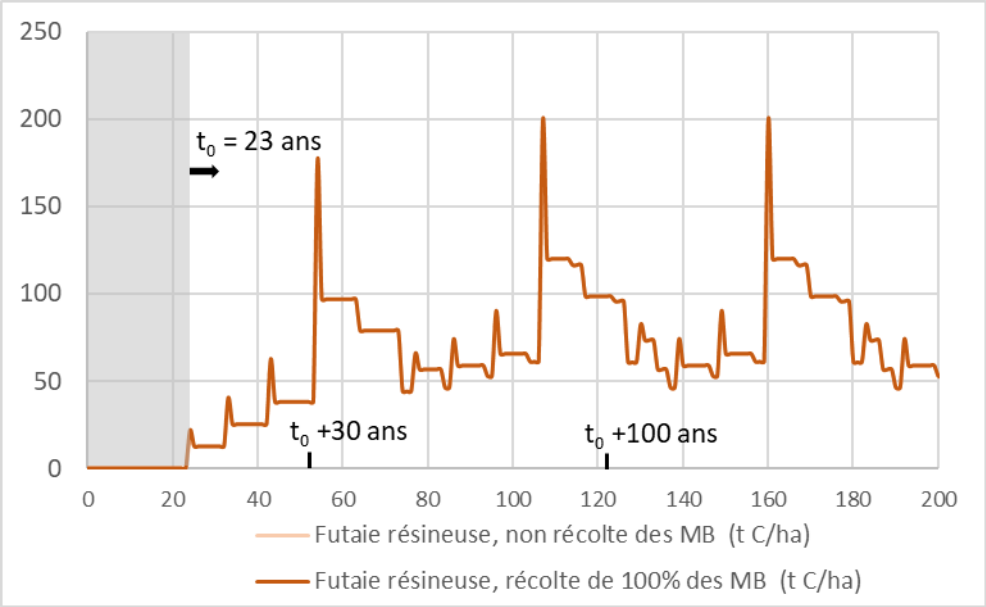
14.10.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 156 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_1

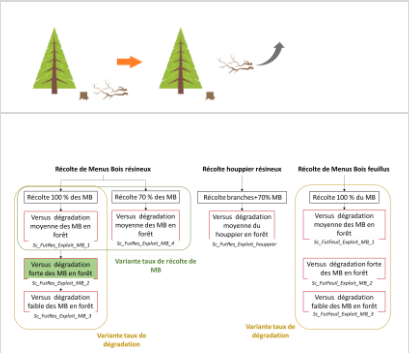


14.10.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 157 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_1



14.11. Sc_FutRes_Exploit_MB_2



Sc_FutRes_Exploit_MB_2 : Variante en considérant un taux de dégradation fort des menus bois

- Scénario de référence :
  - Les menus bois ne sont pas récoltés et se dégradent en forêt avec une demi-vie de 3 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 100 % menus bois en éclaircie et en coupe rase d'une futaie de résineux (290 m³ de MB récoltés par ha à chaque révolution de 53 ans).
  - Utilisation des MB en énergie.

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 20 ans.

Tableau 173 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_2

	Unité	Futaie résineuse, récolte des MB	Futaie résineuse, non récolte des MB, dégradation forte des MB
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	1261	967
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	486	370
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2503	1913
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	23,8	18
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	16,2	12
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	25,0	19
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	225,4	173
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	86,8	66
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	447,2	342
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	4,3	3
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	2,9	2
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	4,5	3
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	2062	2062
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	1630	1630
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	3508	3508
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	368	368
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	291	291
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	627	627
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	335	335
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	480	480
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	346	346
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	59,9	59,9

	Unité	Futaie résineuse, récolte des MB	Futaie résineuse, non récolte des MB, dégradation forte des MB
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	86	86
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	61,9	61,9

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	101	101
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	144	144
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	104	104
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	18,0	18,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	26	26
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	18,6	18,6

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	102,8	127
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	34,8	42
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	70,1	82
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	18,4	23
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	6,2	8
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	12,5	15

STOCKS en forêt - total

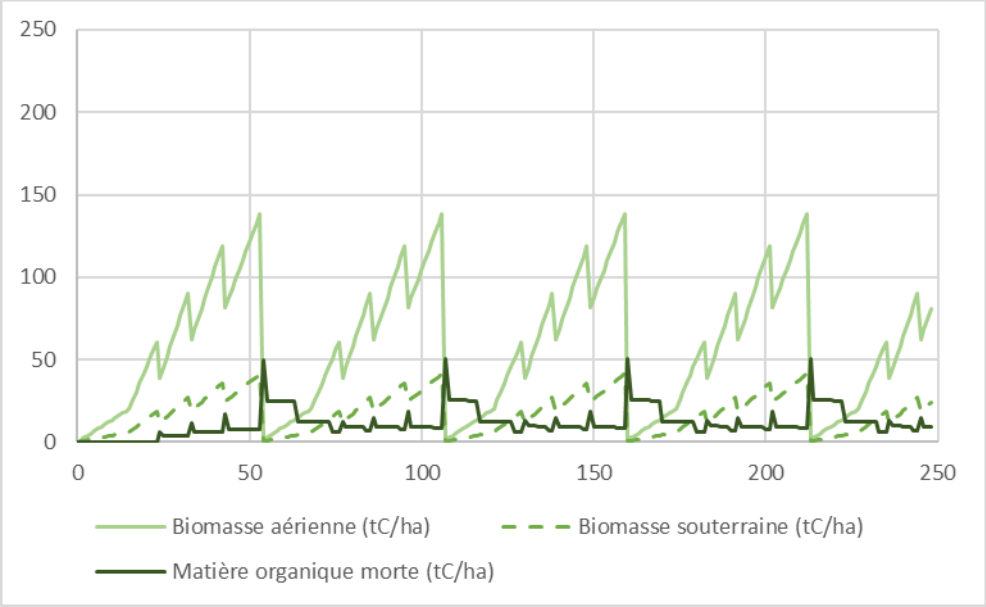
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	539	562
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	659	666
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	520	532
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	96	100
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	118	119
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	93	95

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	389	389
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	141	136
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	356	350
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	69,5	69
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	25	24
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	63,7	63

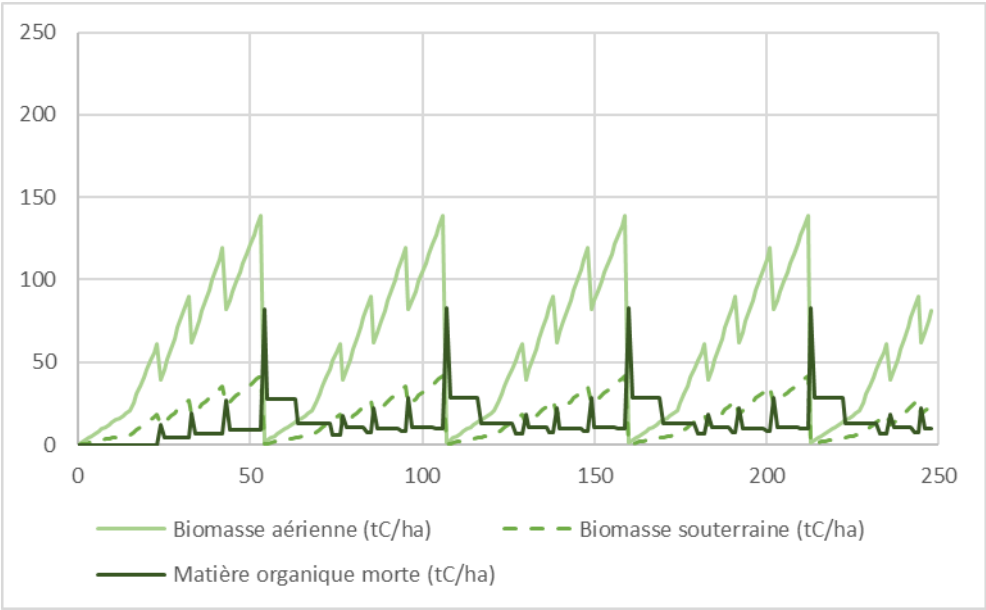
14.11.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 158 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutRes_Exploit_MB_2



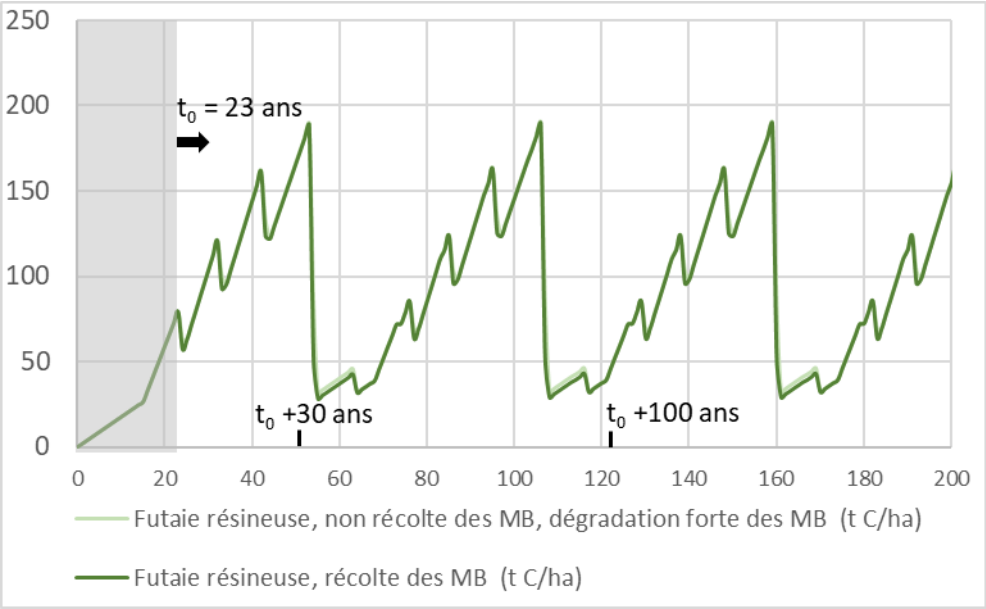
14.11.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 159 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_2



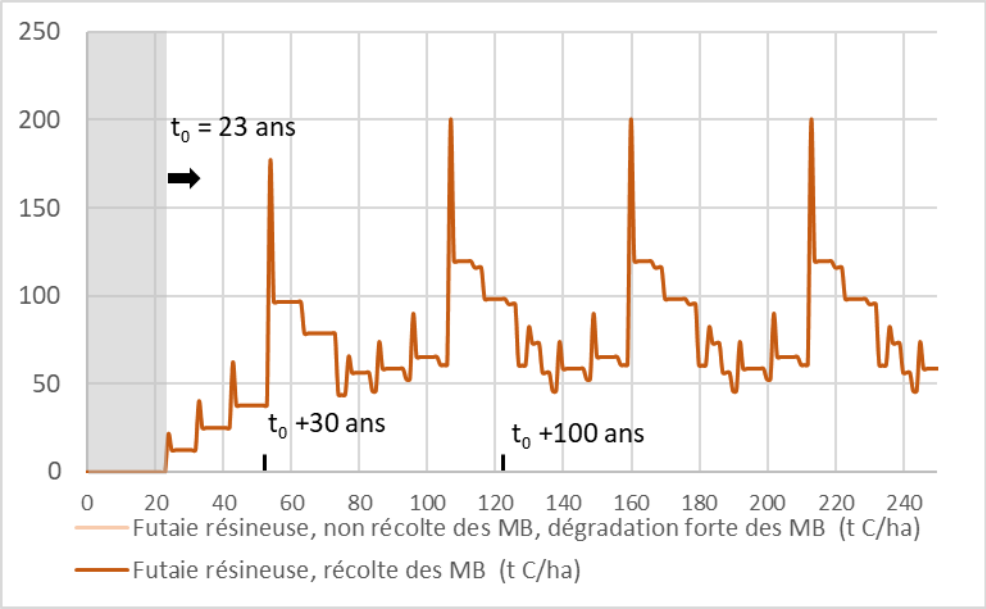
14.11.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 160 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_2

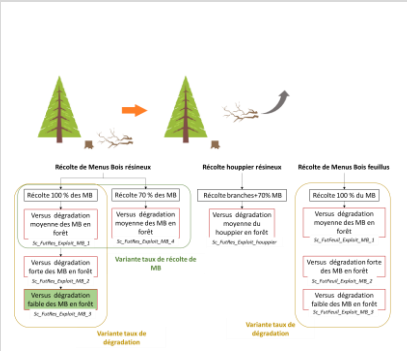


14.11.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 161 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_2



14.12. Sc_FutRes_Exploit_MB_3



Sc_FutRes_Exploit_MB_3: Variante en considérant un taux de dégradation faible des menus bois

- Scénario de référence :
  - Les menus bois ne sont pas récoltés et se dégradent en forêt avec un demi-vie de 7 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 100 % menus bois en éclaircie et en coupe rase d'un futaie résineux (290 m³ de MB récoltés par ha à chaque révolution de 53 ans).
  - Utilisation des MB en énergie.

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 20 ans.

Tableau 174 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_3

	Unité	Futaie résineuse, récolte des MB	Futaie résineuse, non récolte des MB, dégradation faible des MB
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	1261	967
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	486	370
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2503	1913
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	23,8	18
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	16,2	12
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	25,0	19
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	225,4	173
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	86,8	66
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	447,2	342
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	4,3	3
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	2,9	2
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	4,5	3
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	2062	2062
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	1630	1630
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	3508	3508
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	368	368
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	291	291
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	627	627
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	335	335
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	480	480
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	346	346
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	59,9	59,9

	Unité	Futaie résineuse, récolte des MB	Futaie résineuse, non récolte des MB, dégradation faible des MB
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	86	86
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	61,9	61,9

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	101	101
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	144	144
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	104	104
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	18,0	18,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	26	26
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	18,6	18,6

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	102,8	159
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	34,8	55
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	70,1	107
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	18,4	28
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	6,2	10
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	12,5	19

STOCKS en forêt - total

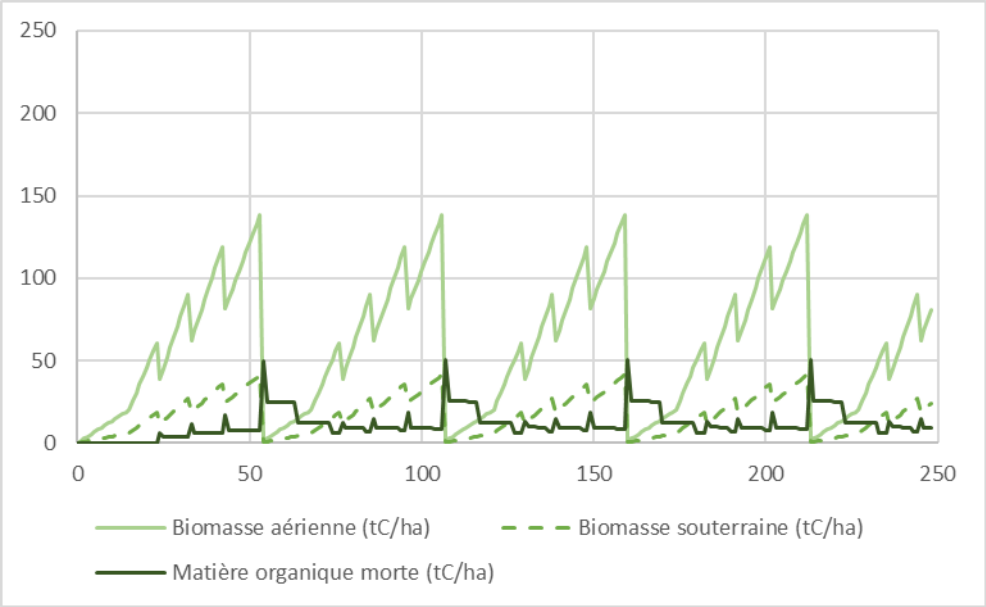
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	539	595
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	659	679
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	520	557
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	96	106
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	118	121
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	93	99

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	389	389
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	141	136
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	356	350
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	69,5	69
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	25	24
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	63,7	63

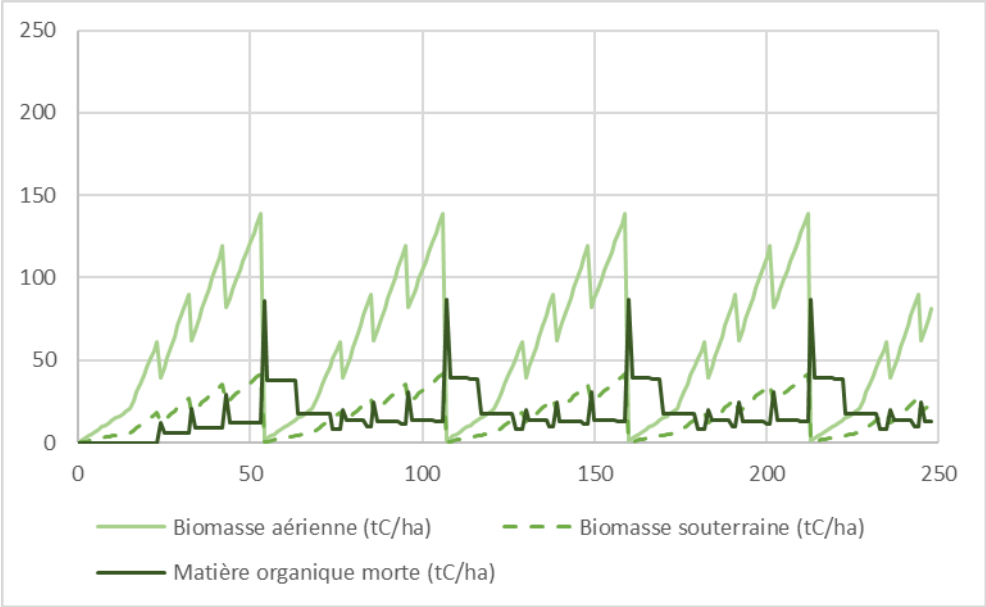
14.12.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 162 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutRes_Exploit_MB_3



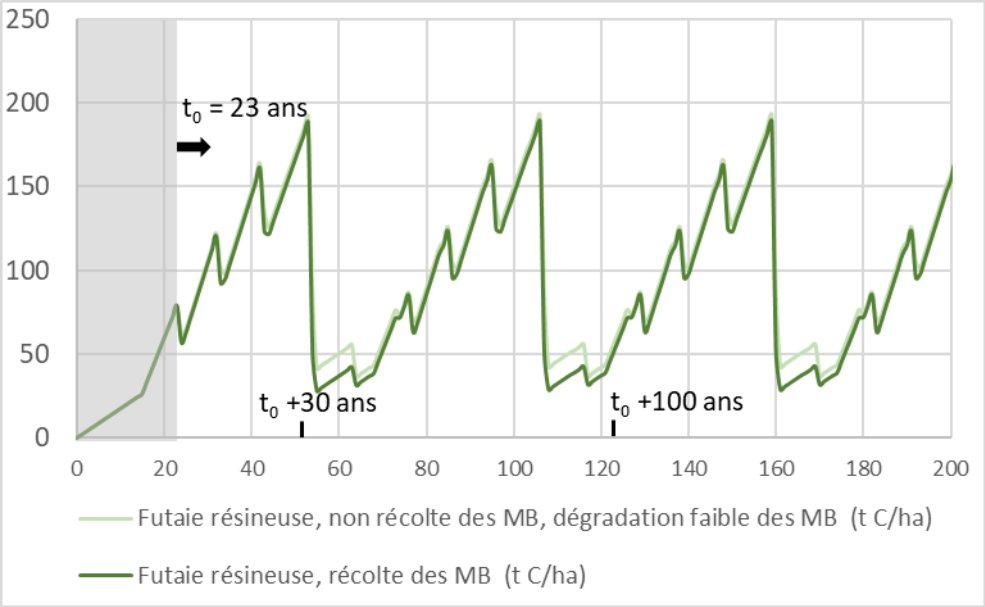
14.12.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 163 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_3



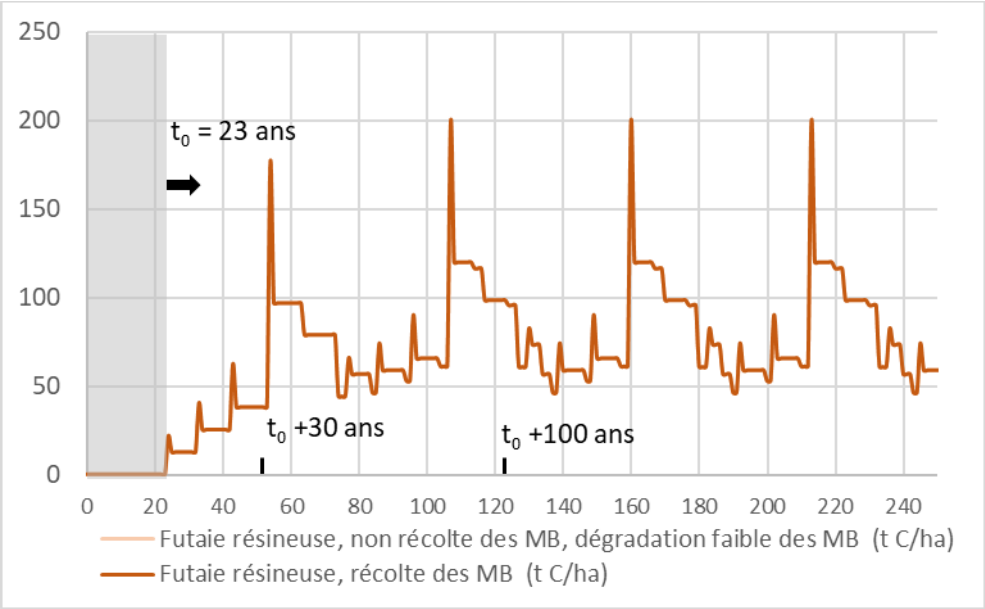
14.12.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 164 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_3

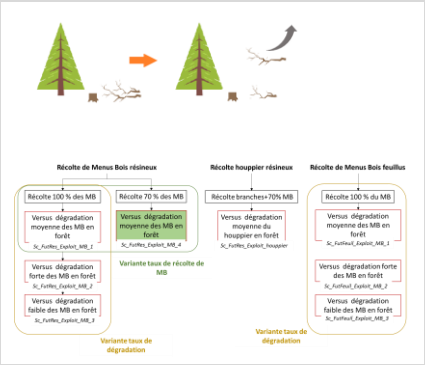


14.12.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 165 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_3



14.13. Sc_FutRes_Exploit_MB_4



Sc_FutRes_Exploit_MB_4 : Récolte de 70 % des menus bois

- Scénario de référence :
  - Les menus bois ne sont pas récoltés et se dégradent en forêt avec une demi-vie de 5 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 70 % menus bois en éclaircie et en coupe rase d'une futaie de résineux (203 m³ de MB récoltés par ha à chaque révolution de 53 ans).
  - Utilisation des MB en énergie

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 20 ans.

Tableau 175 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_4

	Unité	Futaie résineuse, récolte de 70% MB	Futaie résineuse, non récolte des MB
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	1173	967
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	451	370
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2326	1913
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	22,1	18
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	15,0	12
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	23,3	19
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	209,6	173
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	80,6	66
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	415,6	342
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	4,0	3
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	2,7	2
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	4,2	3
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	2062	2062
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	1630	1630
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	3508	3508
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	368	368
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	291	291
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	627	627
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	335	335
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	480	480
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	346	346

	Unité	Futaie résineuse, récolte de 70% MB	Futaie résineuse, non récolte des MB
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	59,9	59,9
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	86	86
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	61,9	61,9

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	101	101
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	144	144
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	104	104
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	18,0	18,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	26	26
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	18,6	18,6

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	114,5	142
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	38,9	48
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	77,0	93
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	20,5	25
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	6,9	9
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	13,7	17

STOCKS en forêt - total

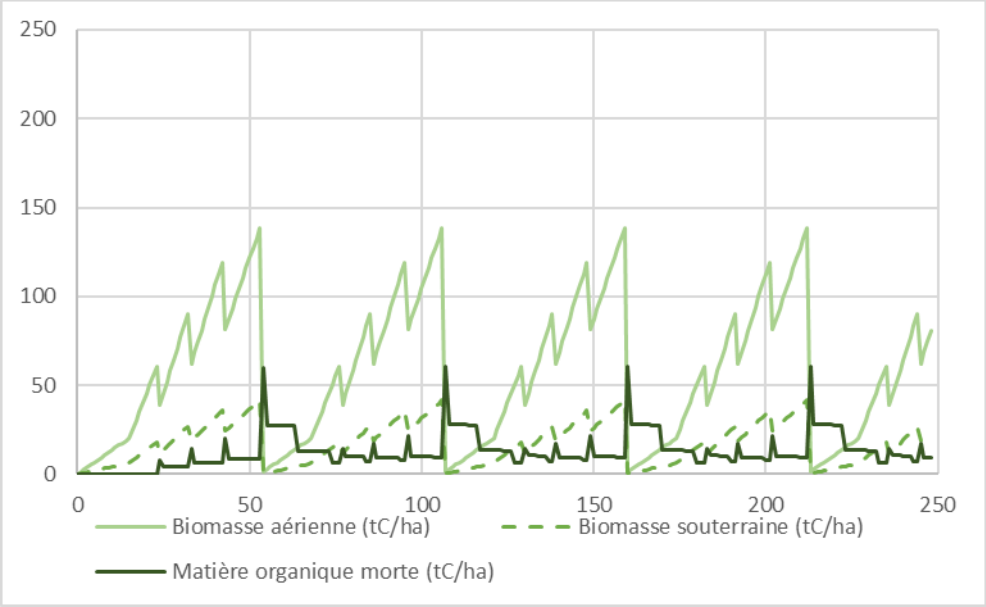
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	550	577
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	663	672
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	527	543
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	98	103
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	118	120
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	94	97

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	388	389
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	139	136
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	355	350
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	69,4	69
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	25	24
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	63,4	63

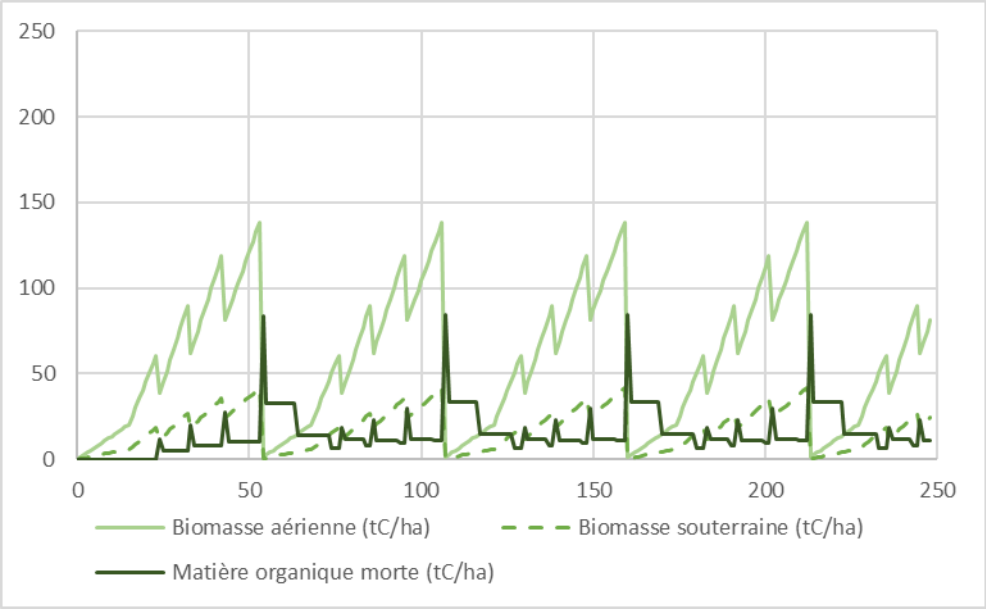
14.13.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 166 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutRes_Exploit_MB_4



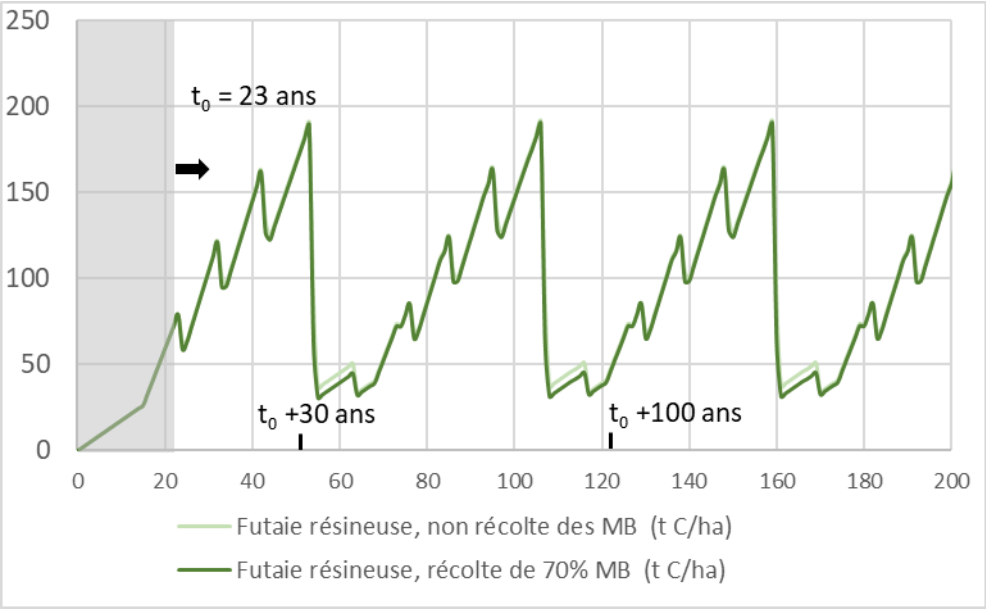
14.13.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 167 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_4



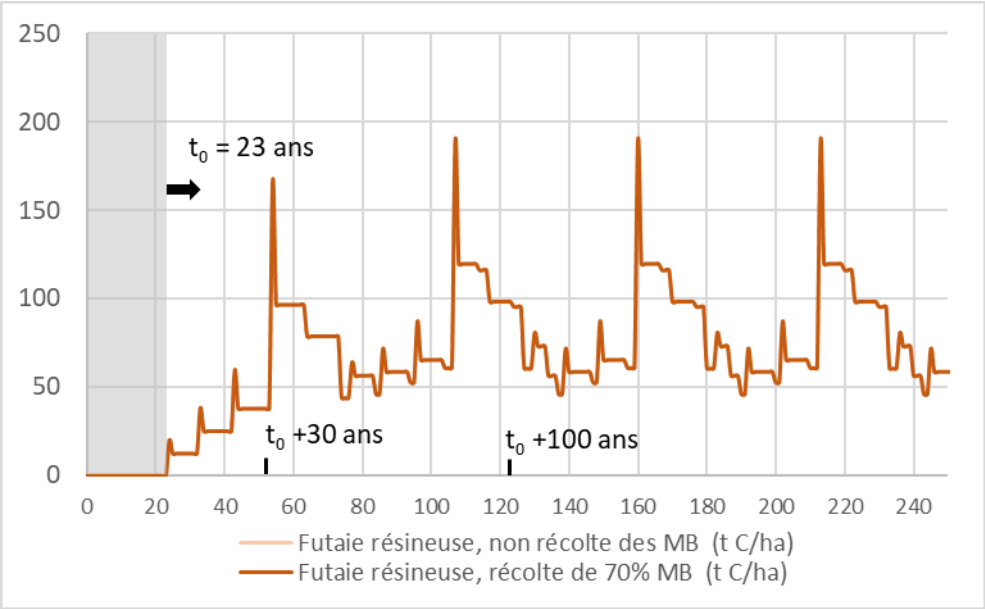
14.13.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 168 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_4

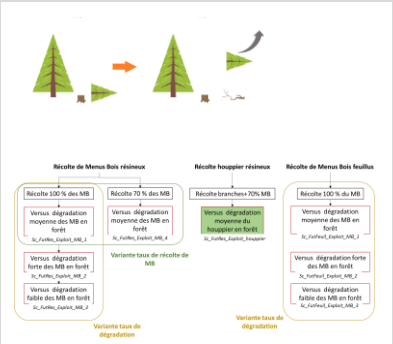


14.13.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 169 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_4



14.14. Sc_FutRes_Exploit_Houppier



Sc_FutRes_Exploit_Houppier : Récolte du houppier par rapport à un scénario sans récolte du houppier

- Scénario de référence :
  - L'ensemble du BIBE et les menus bois (70 %)), n'est pas récolté et se dégrade en forêt avec une demi-vie de 5 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte du houppier/et bois de la tige de faible diamètre en éclaircie et en coupe rase d'une futaie de résineux (180 m³ de BIBE et 203 m³ de MB récoltés par ha à chaque révolution de 53 ans).
  - Utilisation du BI/BE et 70 % du menus bois en énergie.

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 20 ans.

Tableau 176 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Houppier

	Unité	Futaie résineuse, récolte de 70% MB, 100% BE	Futaie résineuse, non récolte du houppier
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	1173	787
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	451	234
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2326	1554
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	22,1	15
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	15,0	8
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	23,3	16
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	209,6	141
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	80,6	42
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	415,6	278
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	4,0	3
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	2,7	1
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	4,2	3
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	2062	2062
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	1630	1630
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	3508	3508
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	368	368
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	291	291
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	627	627
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	335	335
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	480	480
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	346	346

	Unité	Futaie résineuse, récolte de 70% MB, 100% BE	Futaie résineuse, non récolte du houppier
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	59,9	59,9
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	86	86
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	61,9	61,9

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	101	101
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	144	144
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	104	104
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	18,0	18,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	26	26
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	18,6	18,6

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	114,5	191
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	38,9	86
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	77,0	129
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	20,5	34
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	6,9	15
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	13,7	23

STOCKS en forêt - total

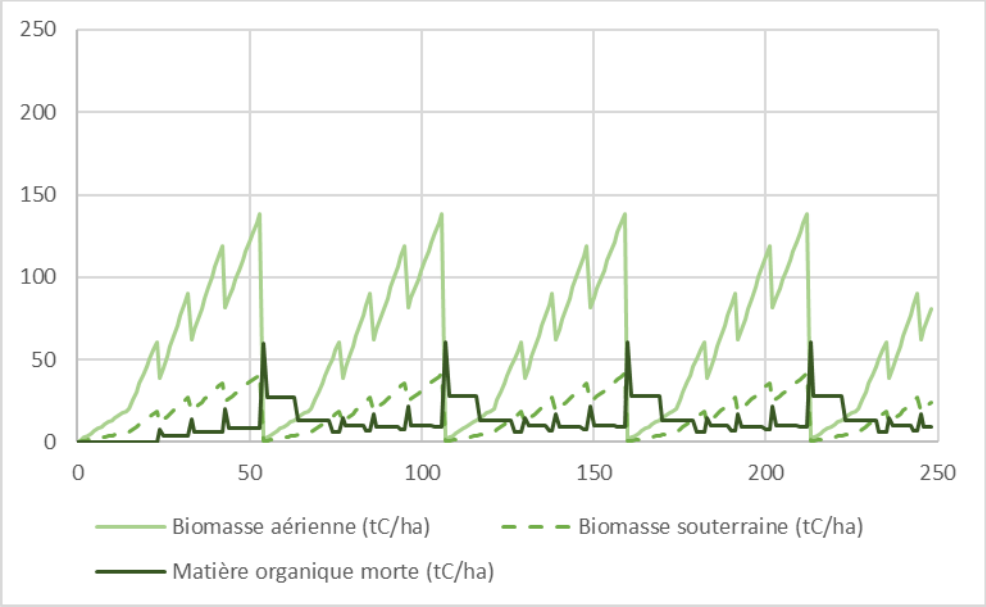
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	550	626
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	663	710
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	527	579
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	98	112
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	118	127
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	94	103

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	305	305
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	76	68
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	271	263
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	54,4	54
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	14	12
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	48,5	47

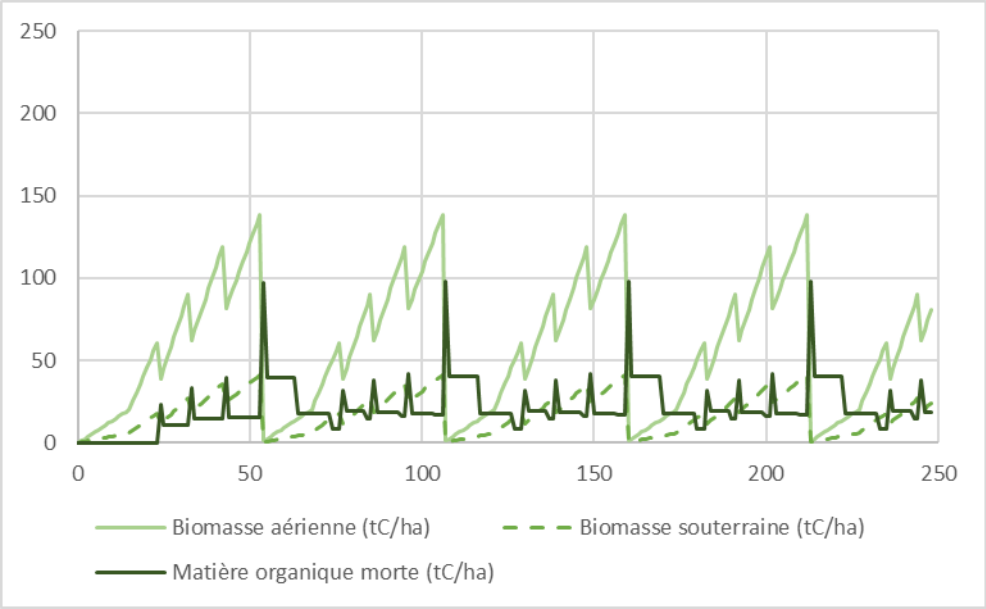
14.14.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 170 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutRes_Exploit_Houppier



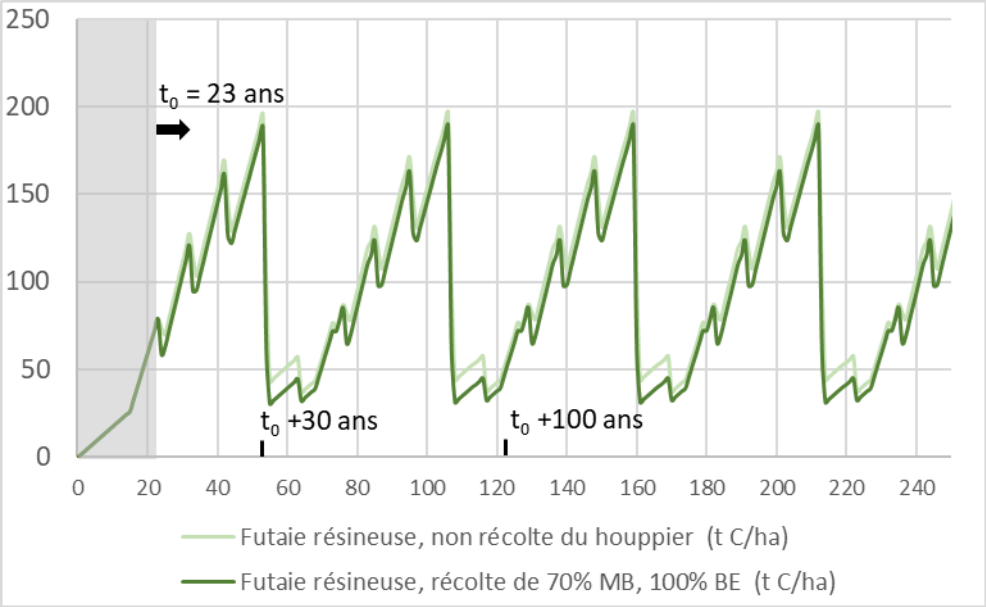
14.14.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 171 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Houppier



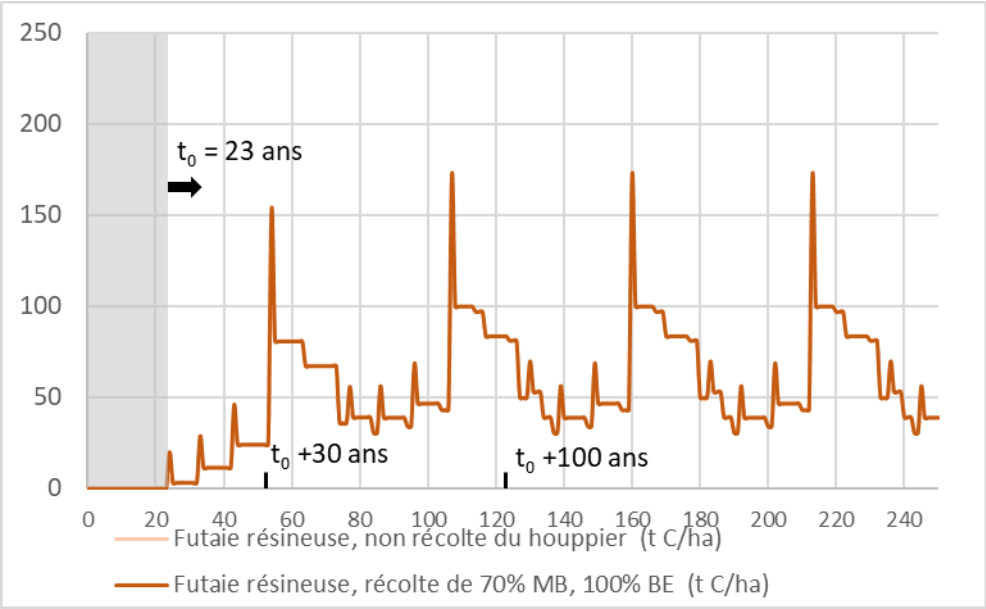
14.14.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 172 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Houppier



14.14.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 173 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Houppier



14.15. Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1

Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1 : Récolte de 100 % des menus bois

- Scénario de référence :
  - Les menus bois ne sont pas récoltés et se dégradent en forêt avec une demi-vie de 5 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 100 % menus bois en éclaircie et en coupe finale d'une futaie de feuillus (775 m³ de MB récoltés par ha à chaque révolution de 170 ans).
  - Utilisation des MB en énergie.

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 60 ans.

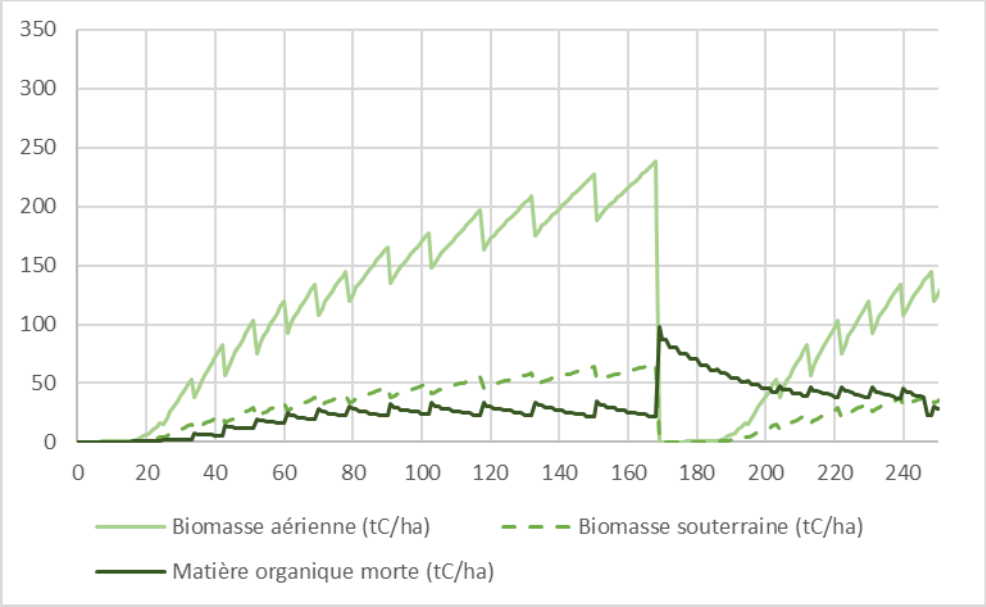
Tableau 177 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1

	Unité	Futaie feuillue, récolte des MB	Futaie feuillue, non récolte des MB
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	2170	1354
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	373	220
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	1058	633
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	12,8	8
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	12,4	7
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	10,6	6
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	542,5	338
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	93,2	55
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	264,6	158
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	3,2	2
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	3,1	2
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	2,6	2
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	3112	3112
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	1070	1070
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2331	2331
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	778	778
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	267	267
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	583	583
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	502	502
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	320	320
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	535	535
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	125,4	125,4
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	80	80
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	133,7	133,7

	Unité	Futaie feuillue, récolte des MB	Futaie feuillue, non récolte des MB
STOCKS en forêt - biomasse souterraine			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	140	140
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	90	90
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	150	150
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	35,1	35,1
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	22	22
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	37,4	37,4
STOCKS en forêt - matière organique morte			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	173,1	207
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	48,4	72
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	87,0	110
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	43,3	52
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	12,1	18
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	21,7	28
STOCKS en forêt - total			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	815	849
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	458	482
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	772	795
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	204	212
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	115	121
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	193	199
STOCKS dans les produits			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	138	138
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	38	34
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	73	69
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	34,6	35
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	10	9
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	18,2	17

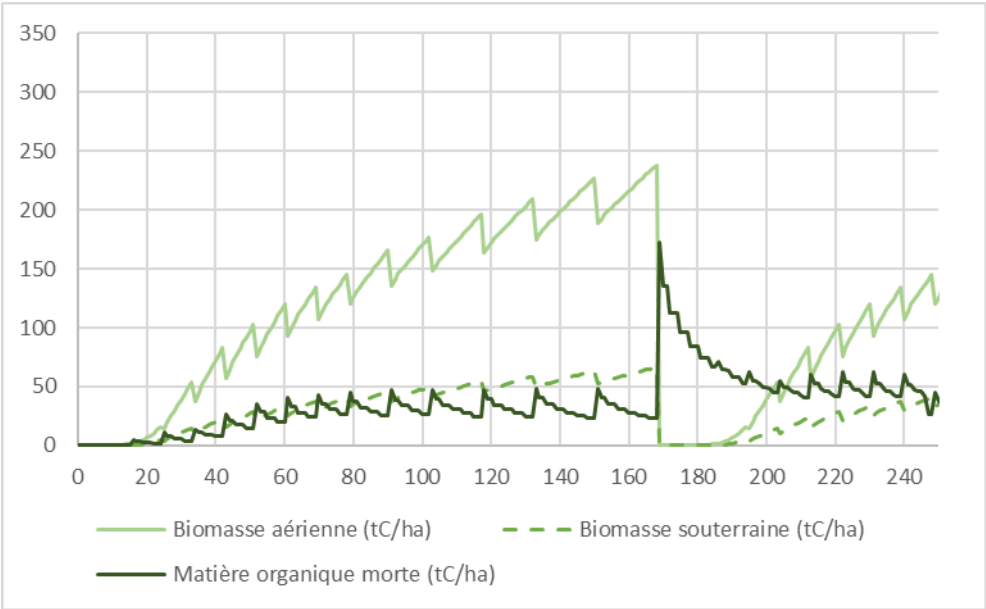
14.15.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 174 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1



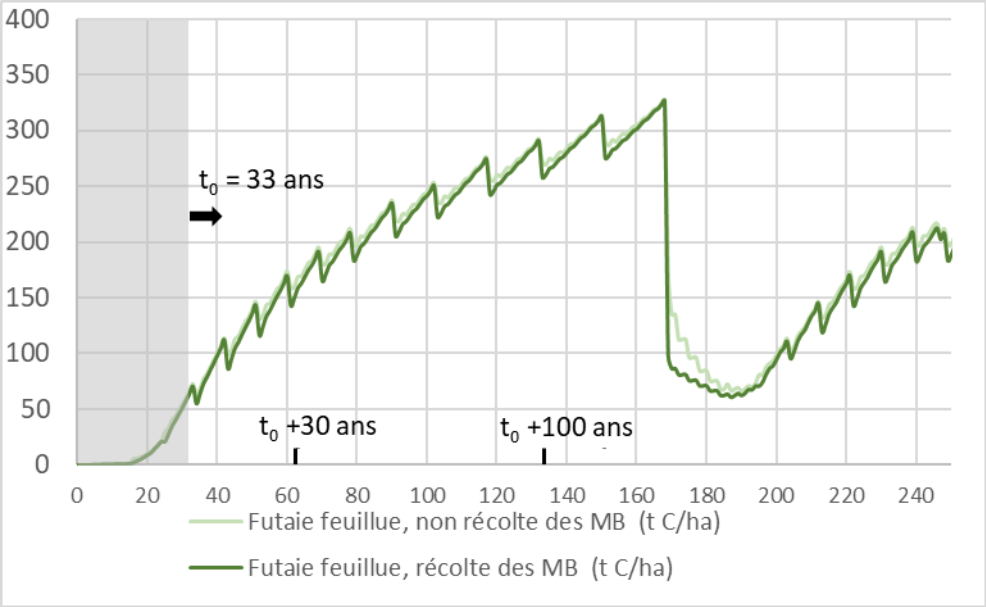
14.15.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 175 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1



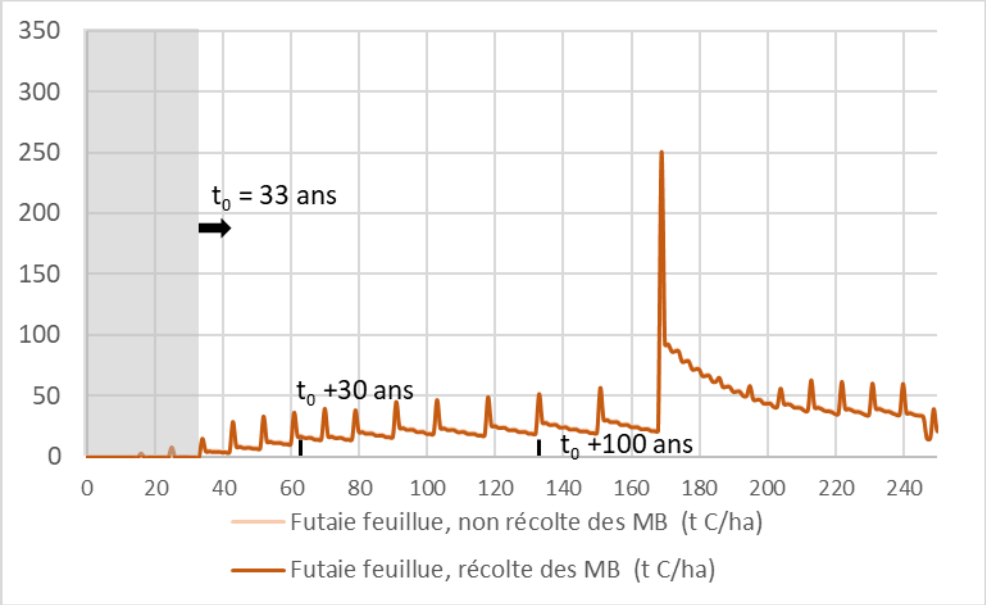
14.15.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 176 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1



14.15.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 177 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1



14.16. Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2

Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2 : Variante en considérant un taux de dégradation fort des menus bois

- Scénario de référence :
  - Les menus bois ne sont pas récoltés et se dégradent en forêt avec une demi-vie de 3 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 100 % menus bois en éclaircie et en coupe finale d'une futaie de feuillus (775 m³ de MB récoltés par ha à chaque révolution de 170 ans).
  - Utilisation des MB en énergie.

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 60 ans.

Tableau 178 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2

	Unité	Futaie feuillue, récolte des MB	Futaie feuillue, non récolte des MB, dégradation forte des MB
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	2170	1354
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	373	220
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	1058	633
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	12,8	8
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	12,4	7
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	10,6	6
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	542,5	338
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	93,2	55
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	264,6	158
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	3,2	2
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	3,1	2
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	2,6	2
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	3112	3112
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	1070	1070
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2331	2331
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	778	778
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	267	267
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	583	583
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	502	502
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	320	320
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	535	535
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	125,4	125,4
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	80	80
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	133,7	133,7

	Unité	Futaie feuillue, récolte des MB	Futaie feuillue, non récolte des MB, dégradation forte des MB

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	140	140
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	90	90
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	150	150
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	35,1	35,1
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	22	22
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	37,4	37,4

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	173,1	193
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	48,4	62
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	87,0	99
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	43,3	48
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	12,1	16
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	21,7	25

STOCKS en forêt - total

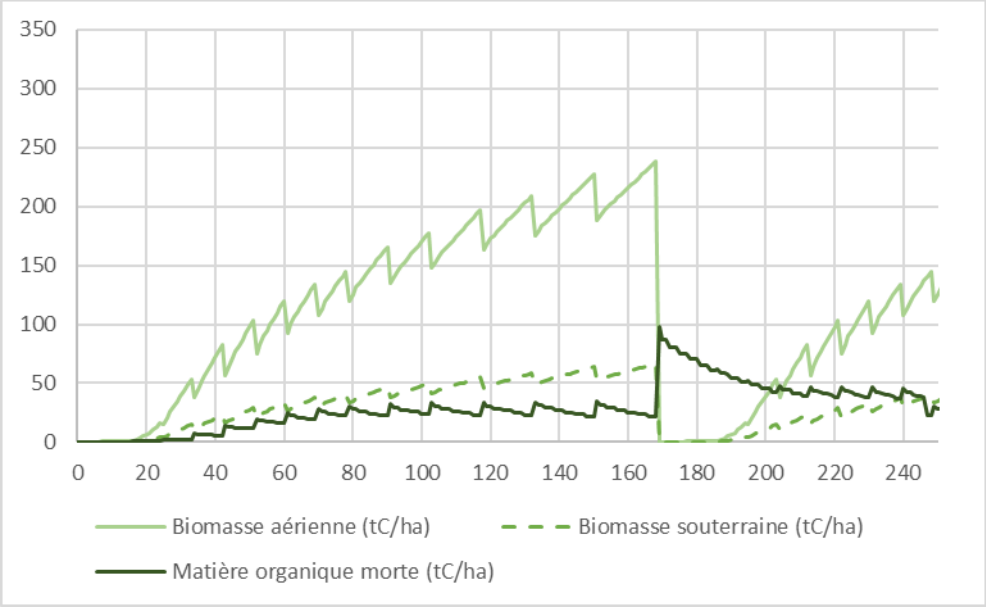
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	815	835
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	458	472
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	772	784
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	204	209
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	115	118
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	193	196

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	138	138
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	38	34
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	73	69
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	34,6	35
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	10	9
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	18,2	17

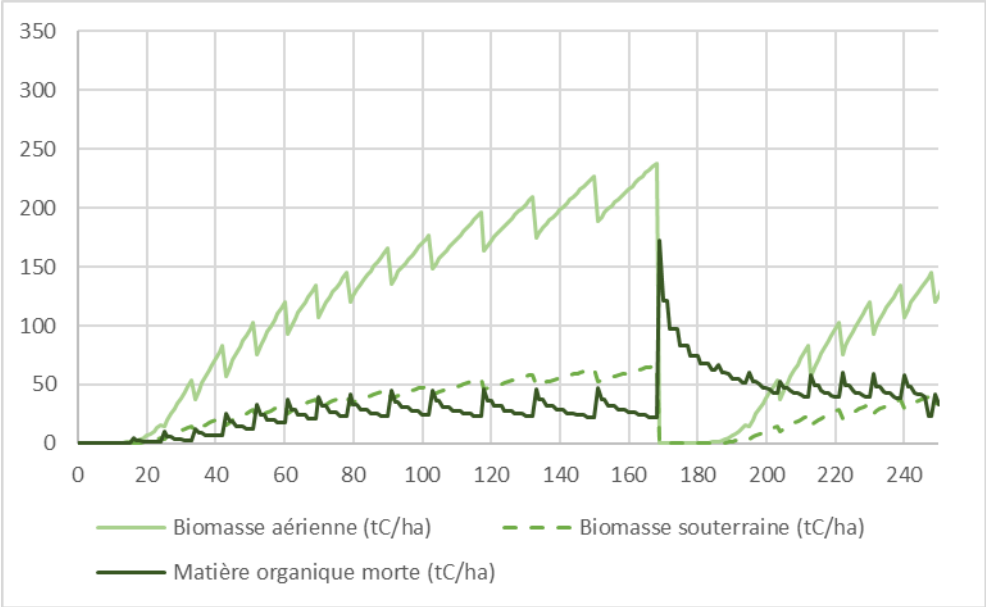
14.16.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 178 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2



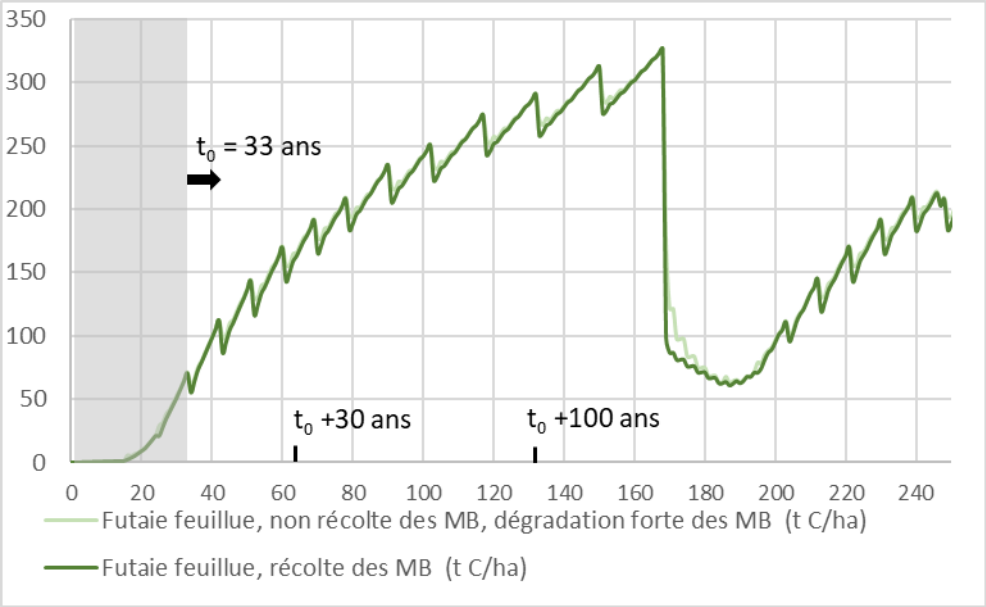
14.16.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 179 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2



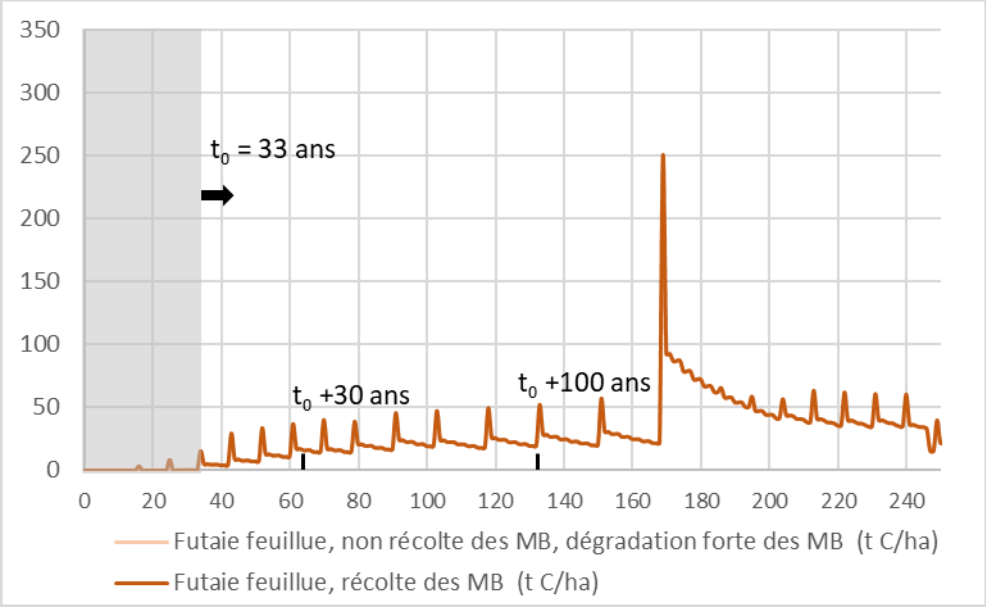
14.16.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 180 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2

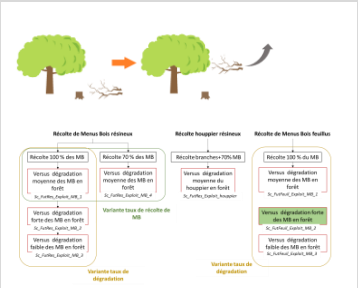


14.16.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 181 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2



14.17. Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3



Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3: Variante en considérant un taux de dégradation faible des menus bois

- Scénario de référence :
  - Les menus bois ne sont pas récoltés et se dégradent en forêt avec un demi-vie de 7 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 100 % menus bois en éclaircie et en coupe finale d'un futaie résineux (775 m³ de MB récoltés par ha à chaque révolution de 170 ans).
  - Utilisation des MB en énergie.

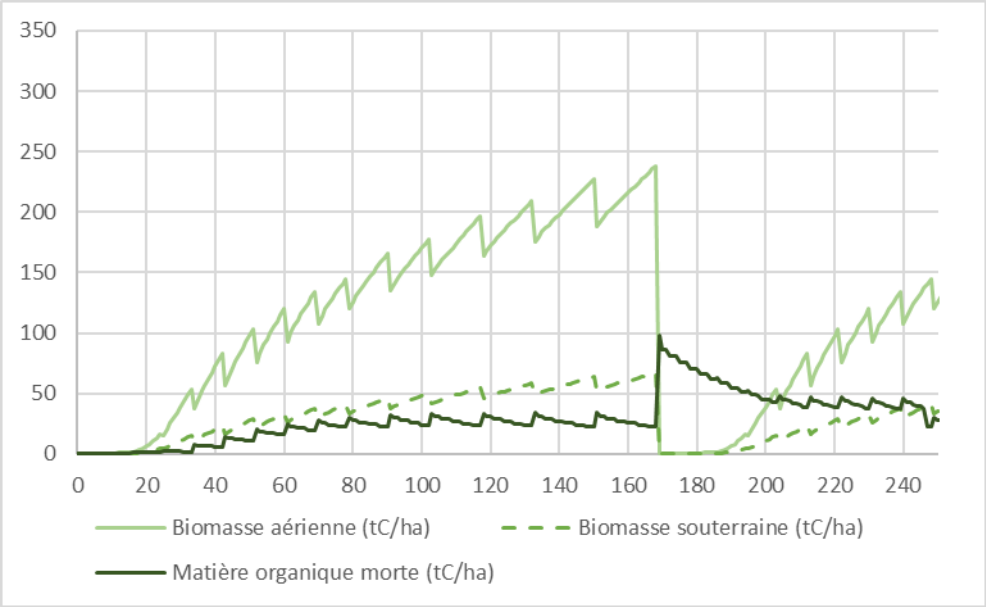
Tableau 179 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3

	Unité	Futaie feuillue, récolte des MB	Futaie feuillue, non récolte des MB, dégradation faible
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	2170	1354
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	373	220
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	1058	633
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	12,8	8
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	12,4	7
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	10,6	6
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	542,5	338
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	93,2	55
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	264,6	158
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	3,2	2
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	3,1	2
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	2,6	2
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	3112	3112
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	1070	1070
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2331	2331
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	778	778
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	267	267
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	583	583
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	502	502
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	320	320
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	535	535
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	125,4	125,4
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	80	80
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	133,7	133,7

	Unité	Futaie feuillue, récolte des MB	Futaie feuillue, non récolte des MB, dégradation faible
STOCKS en forêt - biomasse souterraine			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	140	140
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	90	90
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	150	150
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	35,1	35,1
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	22	22
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	37,4	37,4
STOCKS en forêt - matière organique morte			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	173,1	222
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	48,4	81
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	87,0	121
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	43,3	55
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	12,1	20
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	21,7	30
STOCKS en forêt - total			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	815	864
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	458	491
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	772	806
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	204	216
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	115	123
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	193	201
STOCKS dans les produits			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	138	138
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	38	34
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	73	69
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	34,6	35
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	10	9
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	18,2	17

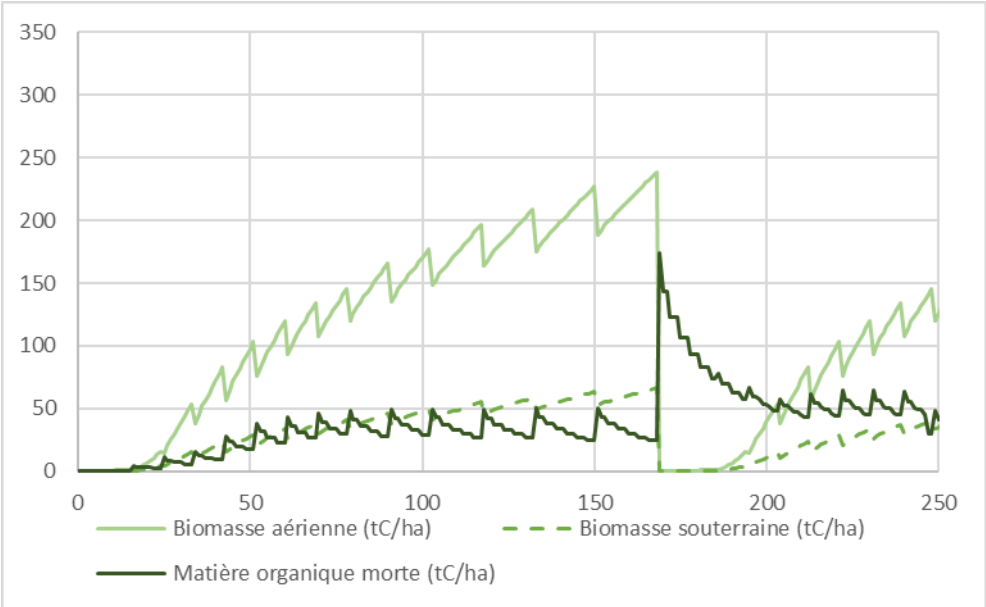
14.17.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 182 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3



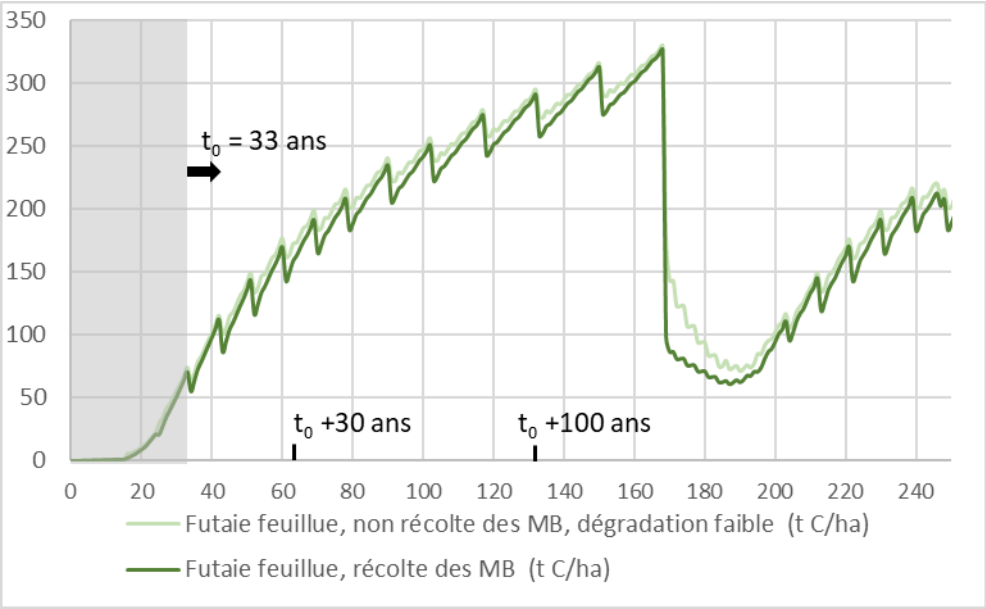
14.17.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 183 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3



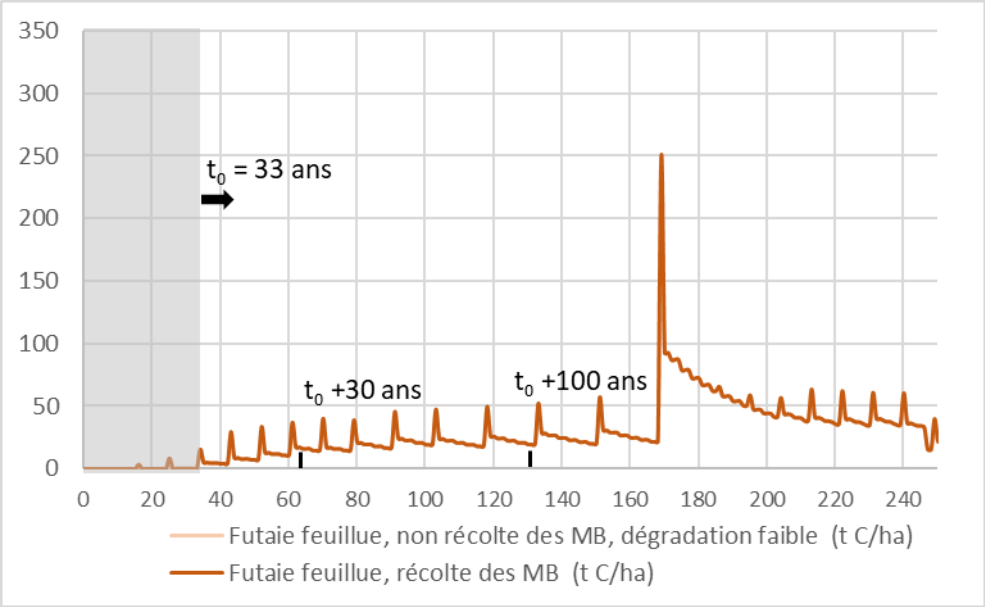
14.17.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 184 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3

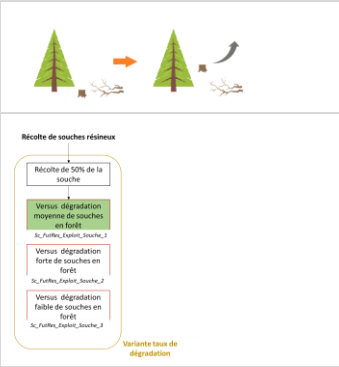


14.17.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 185 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3



14.18. Sc_FutRes_Exploit_Souche_1



Sc_FutRes_Exploit_Souche_1 : Récolte des souches

- Scénario de référence :
  - Les souches ne sont pas récoltées et se dégradent en forêt avec une demi-vie de 10 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 50 % des souches (188 m³ récoltés par ha à chaque révolution de 53 ans).
  - Utilisation des souches en énergie.

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 20 ans.

Tableau 180 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_Souche_1

	Unité	Futaie résineuse, récolte des souches	Futaie résineuse, non récolte des souches
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	1156	967
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	813	679
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2292	1913
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	21,8	18
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	27,1	23
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	22,9	19
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	206,5	173
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	145,4	121
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	409,5	342
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	3,9	3
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	4,8	4
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	4,1	3
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	3260	3260
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	2385	2385
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	4683	4683
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	582	582
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	426	426
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	837	837
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	335	335
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	174	174
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	316	316

	Unité	Futaie résineuse, récolte des souches	Futaie résineuse, non récolte des souches
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	59,9	59,9
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	31	31
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	56,5	56,5

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	101	101
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	52	52
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	95	95
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	18,0	18,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	9	9
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	17,0	17,0

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	90,3	142
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	73,6	119
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	60,9	99
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	16,1	25
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	13,2	21
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	10,9	18

STOCKS en forêt - total

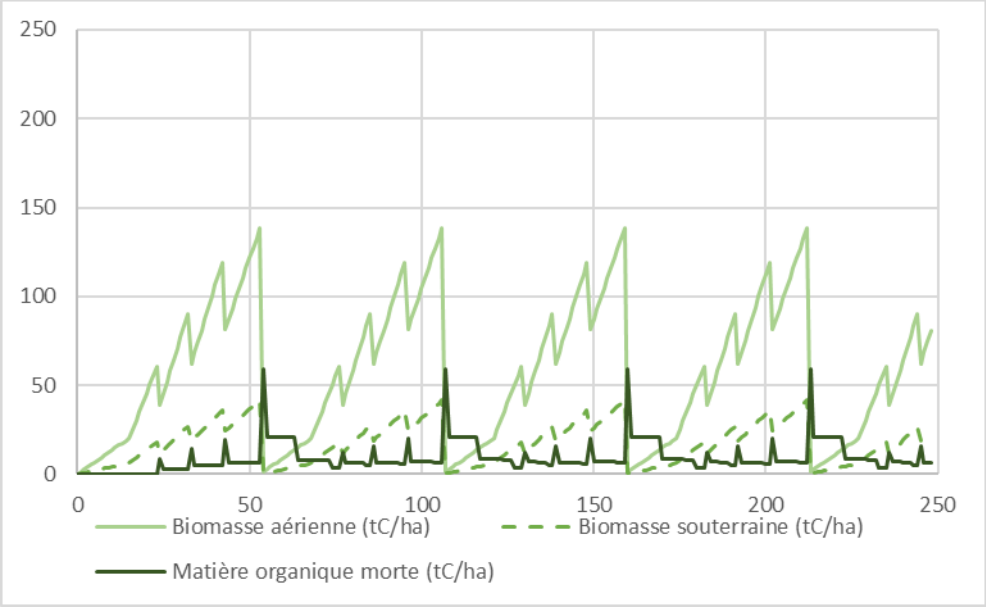
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	526	577
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	300	346
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	472	510
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	94	103
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	54	62
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	84	91

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	389	389
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	450	445
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	430	426
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	69,5	69
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	80	79
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	76,8	76

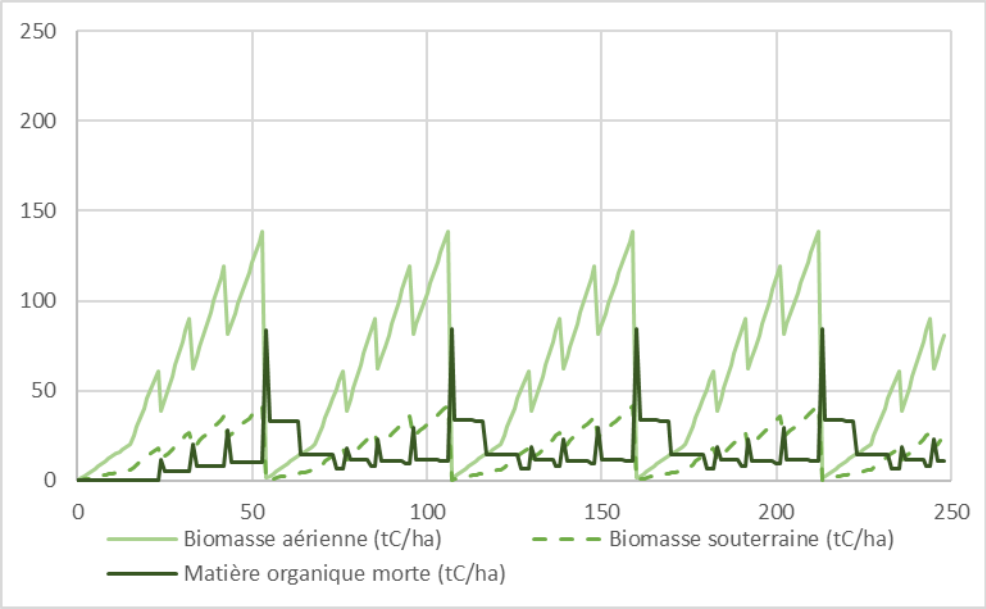
14.18.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 186 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutRes_Exploit_Souche_1



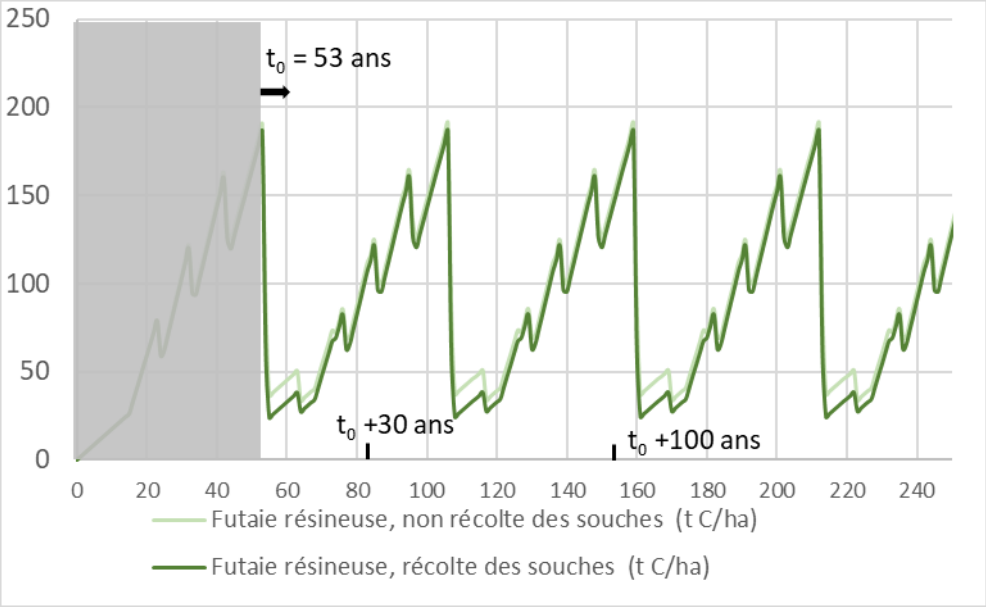
14.18.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 187 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_1



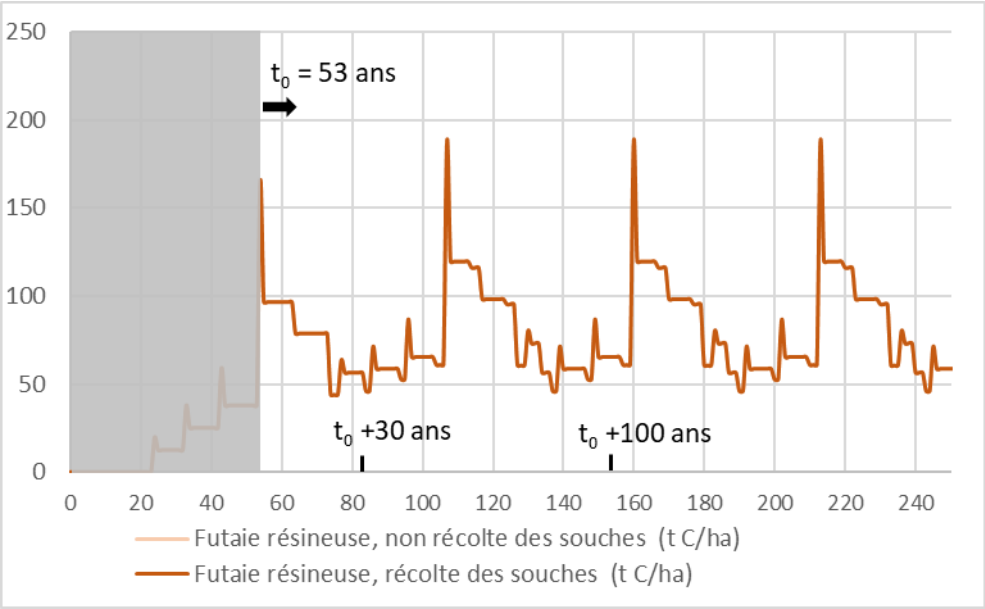
14.18.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 188 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_1

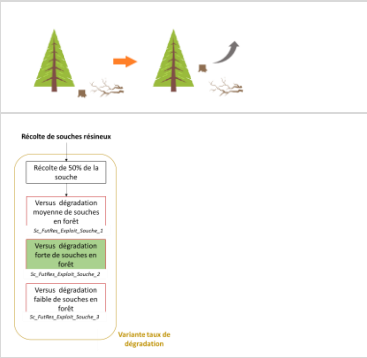


14.18.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 189 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_1



14.19. Sc_FutRes_Exploit_Souche_2



Sc_FutRes_Exploit_Souche_2 : Variante en considérant un taux de dégradation fort des souches

- Scénario de référence :
  - Les souches ne sont pas récoltées et se dégradent en forêt avec une demi-vie de 6 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 50 % des souches (188 m³ récoltés par ha à chaque révolution de 53 ans).
  - Utilisation des souches en énergie.

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 20 ans.

Tableau 181 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_Souche_2

	Unité	Futaie résineuse, récolte des souches, dégradation forte	Futaie résineuse, non récolte des souches, dégradation forte
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	1156	967
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	813	679
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2292	1913
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	21,8	18
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	27,1	23
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	22,9	19
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	206,5	173
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	145,4	121
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	409,5	342
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	3,9	3
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	4,8	4
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	4,1	3
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	3260	3260
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	2385	2385
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	4683	4683
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	582	582
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	426	426
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	837	837
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	335	335
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	174	174
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	316	316

	Unité	Futaie résineuse, récolte des souches, dégradation forte	Futaie résineuse, non récolte des souches, dégradation forte
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	59,9	59,9
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	31	31
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	56,5	56,5

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	101	101
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	52	52
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	95	95
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	18,0	18,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	9	9
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	17,0	17,0

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	69,6	100
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	52,0	76
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	42,2	62
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	12,4	18
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	9,3	14
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	7,5	11

STOCKS en forêt - total

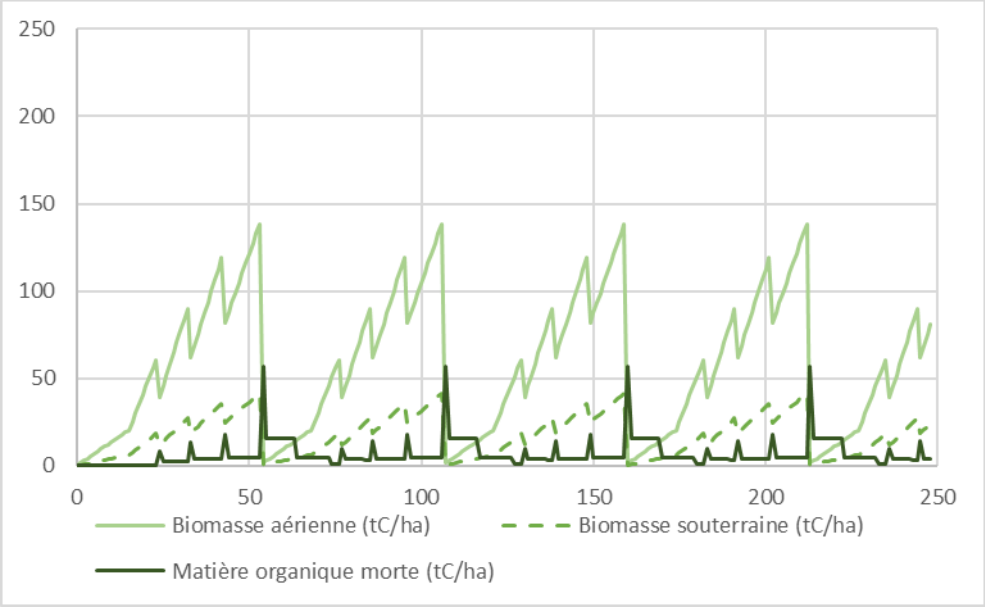
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	505	536
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	279	303
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	454	473
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	90	96
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	50	54
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	81	85

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	389	389
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	450	445
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	430	426
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	69,5	69
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	80	79
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	76,8	76

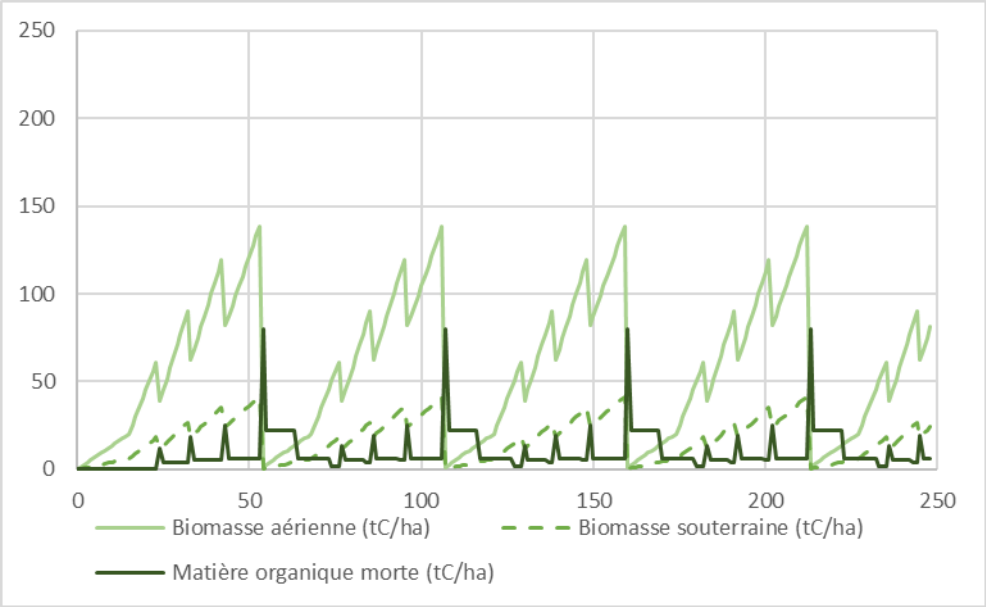
14.19.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 190 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutRes_Exploit_Souche_2



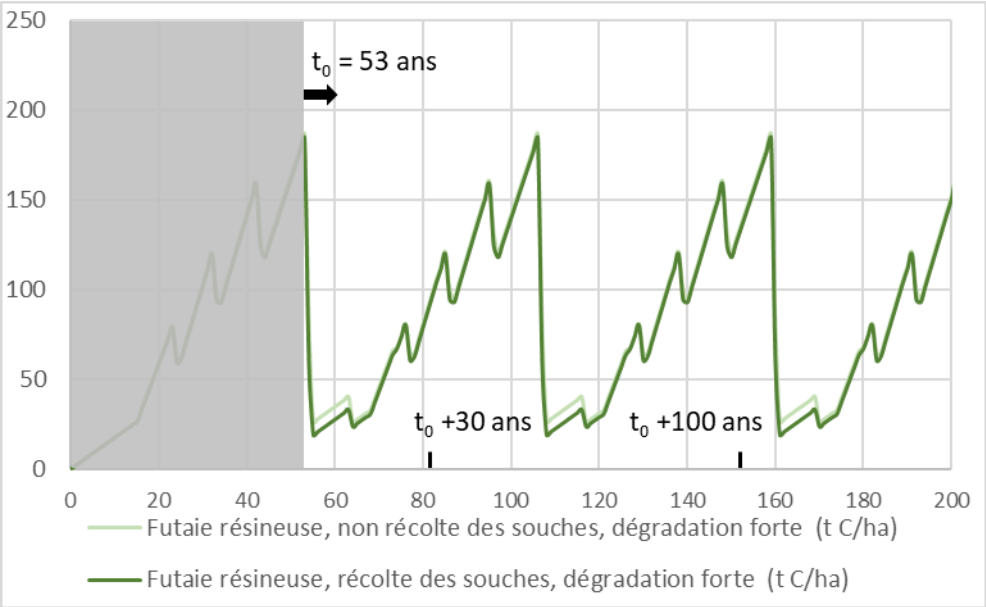
14.19.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 191 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_2



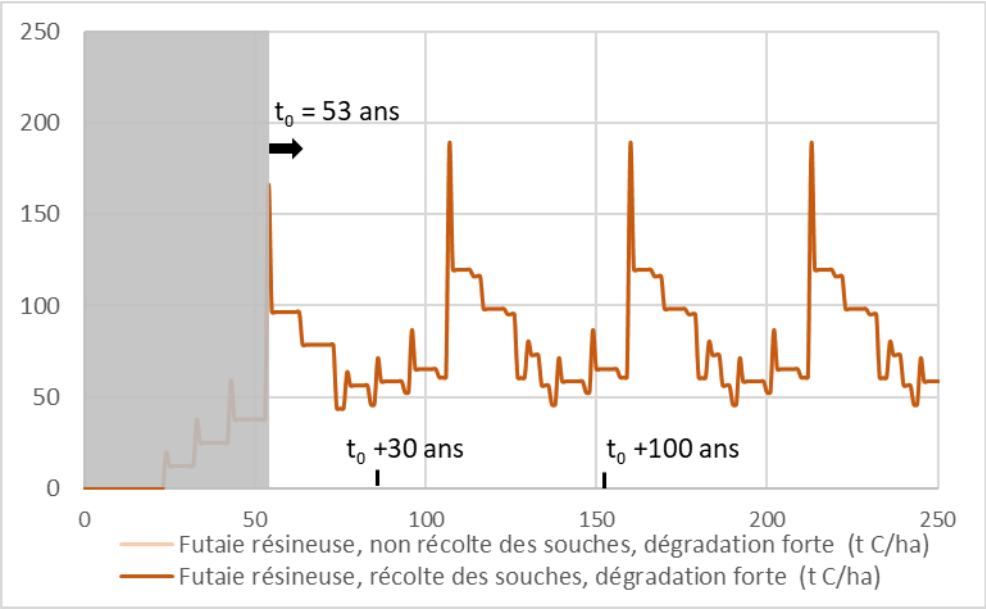
14.19.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 192 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_2

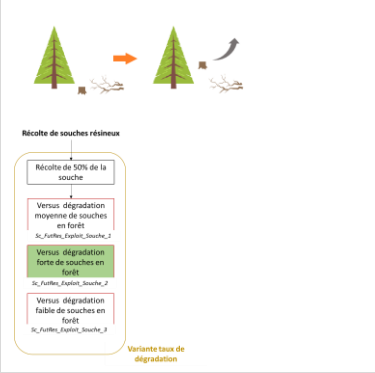


14.19.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 193 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_2



14.20. Sc_FutRes_Exploit_Souche_3



Sc_FutRes_Exploit_Souche_3: Variante en considérant un taux de dégradation faible des souches

- Scénario de référence :
  - Les souches ne sont pas récoltées et se dégradent en forêt avec un demi-vie de 14 ans.
- Scénario projet :
  - Récolte de 50 % des souches (188 m³ récoltés par ha à chaque révolution de 53 ans).
  - Utilisation des souches en énergie.

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 20 ans.

Tableau 182 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_Souche_3

	Unité	Futaie résineuse, récolte des souches, dégradation faible	Futaie résineuse, non récolte des souches, dégradation faible
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	1 156	967
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	813	679
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2 292	1 913
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	21,8	18,2
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	27,1	22,6
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	22,9	19,1
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	207	173
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	145,4	121,3
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	410	342
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	3,90	3,26
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	4,85	4,04
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	4,10	3,42
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	3 260	3 260
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	2 385	2 385
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	4 683	4 683
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	582	582
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	426	426
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	837	837
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	335	335

	Unité	Futaie résineuse, récolte des souches, dégradation faible	Futaie résineuse, non récolte des souches, dégradation faible
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	174	174
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	316	316
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	59,9	59,9
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	31,2	31,2
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	56,5	56,5

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	101	101
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	52	52
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	95	95
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	18,0	18,0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	09,4	09,4
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	17,0	17,0

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	111	183
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	92,1	156,2
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	79,2	136
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	19,8	32,7
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	16,45	27,91
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	14,1	24,2

STOCKS en forêt - total

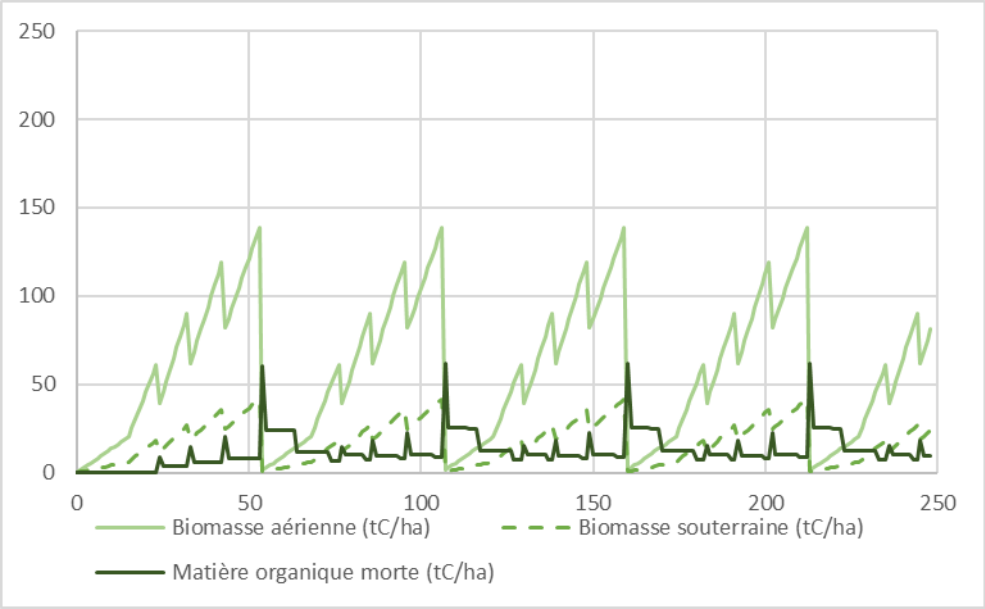
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	547	619
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	319	383
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	491	547
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	97,7	111
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	57	68
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	87,6	98

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	389	389
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	450	445
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	430	426
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	69,5	69,5
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	80,4	79,5
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	76,8	76,1

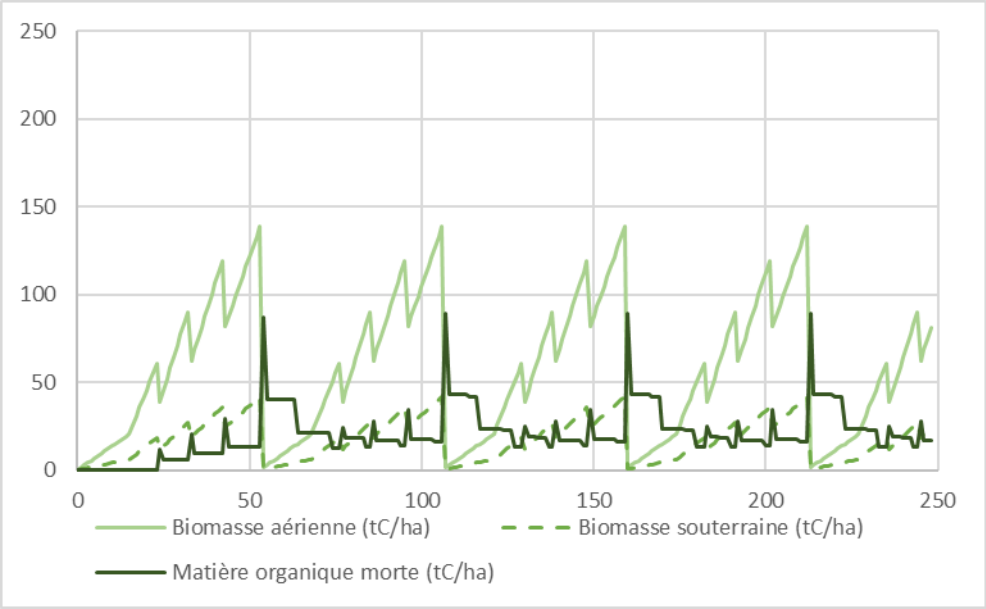
14.20.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 194 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutRes_Exploit_Souche_3



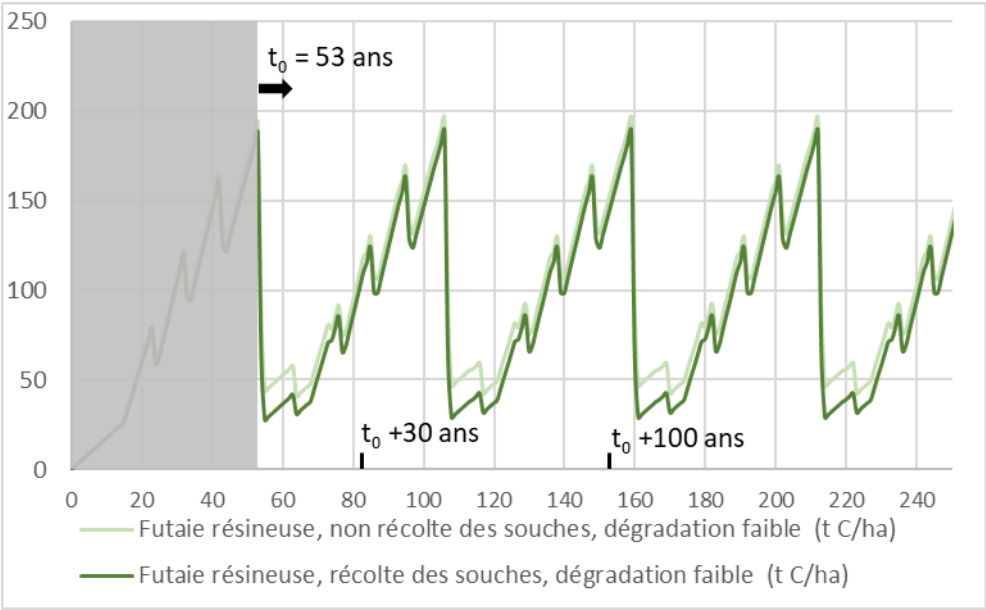
14.20.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 195 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_3



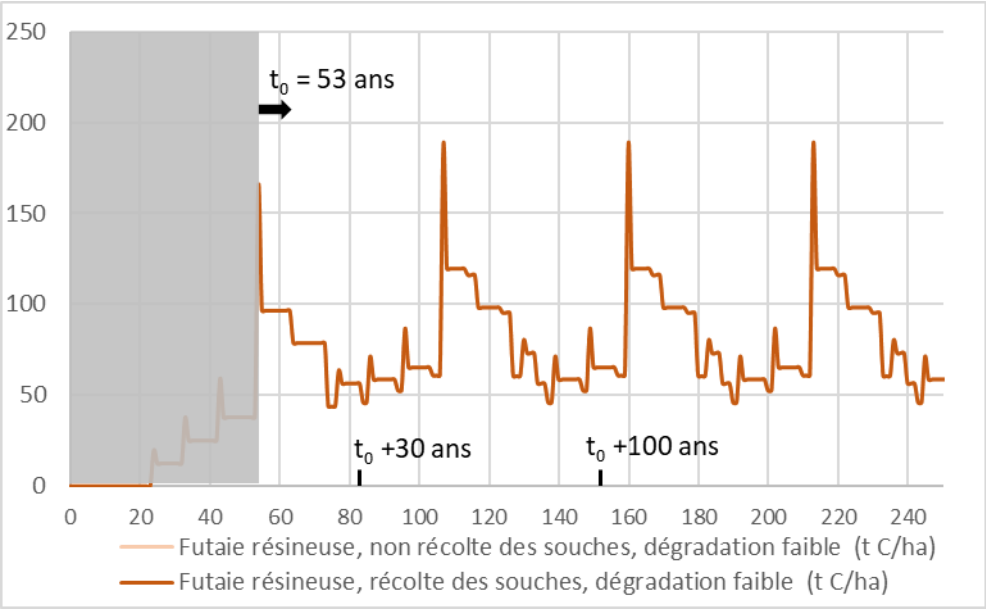
14.20.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 196 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_3

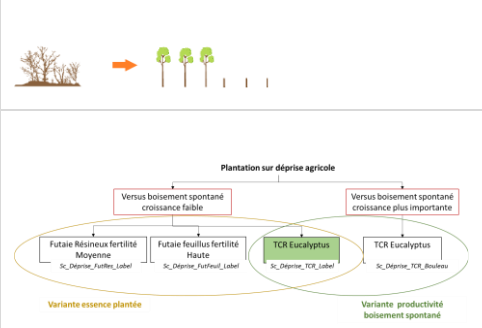


14.20.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 197 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_3



14.21. Sc_Déprise_TCR_Label



Sc_Deprise_TCR_Label : Récolte arbre entier

- Scénario de référence :
  - Scénario de référence boisement spontané du Label bas-carbone (accroissement de 1 m³ par an et par ha).
- Scénario projet :
  - TCR Fertilité haute - production moyenne (bois for tige) : 22 m³/ha/an.
  - Révolution : 30 ans.
  - Récolte arbre entier : 100 % en énergie.

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 0 ans.

Tableau 183 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Déprise_TCR_Label

	Unité	TCR sur déprise agricole	Déprise agricole évoluant accrus Label bas-carbone
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	756	0
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	756	0
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2310	0
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	24,4	0
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	24,4	0
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	23,1	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	191,9	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	191,9	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	586,8	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	6,2	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	6,2	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	5,9	0
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	812	64
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	812	64
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2669	200
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	206	16
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	206	16
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	678	51
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	132	156
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	135	24,4
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	133	77,1

	Unité	TCR sur déprise agricole	Déprise agricole évoluant accrus Label bas-carbone
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	33,6	39,5
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	34,4	6,19
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	33,8	19,6

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	62,7	42,2
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	61,9	8,18
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	61,2	22,7
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	15,9	10,7
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	15,7	2,08
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	15,5	5,75

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	36,7	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	1,3	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	27,5	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	9,33	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	0	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	6,99	0

STOCKS en forêt - total

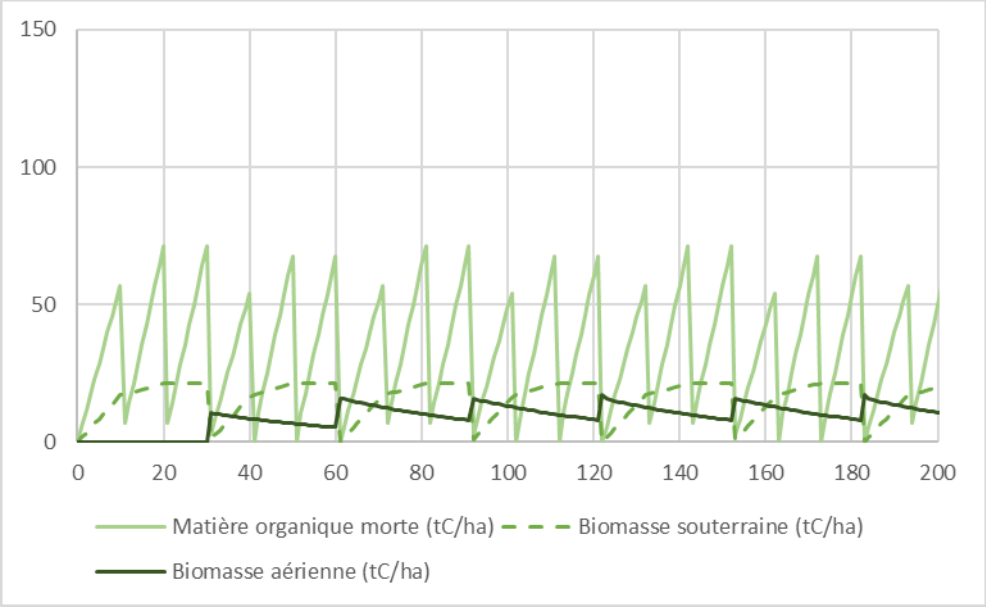
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	232	198
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	199	32,6
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	222	99,7
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	58,8	50,3
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	50,4	8,27
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	56,3	25,3

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	26,4	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	25,9	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	25,6	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	6,69	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	6,57	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	6,50	0

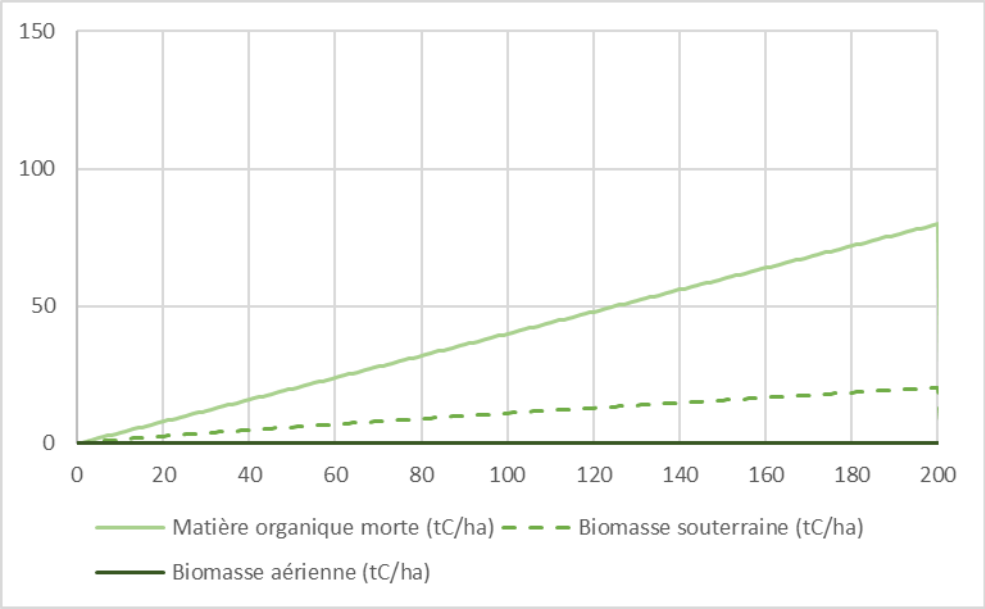
14.21.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 198 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Déprise_TCR_Label



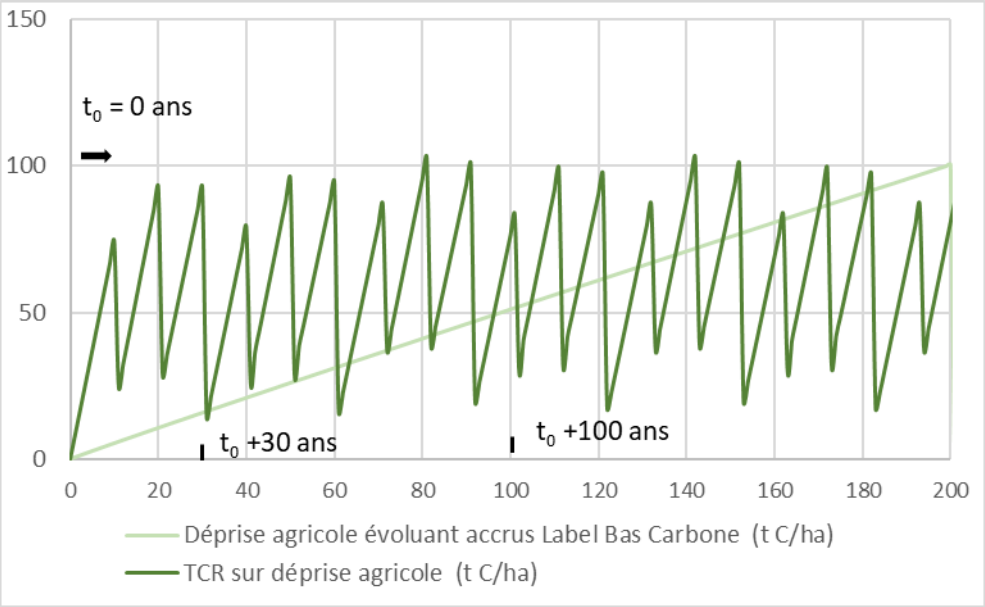
14.21.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 199 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_Déprise_TCR_Label



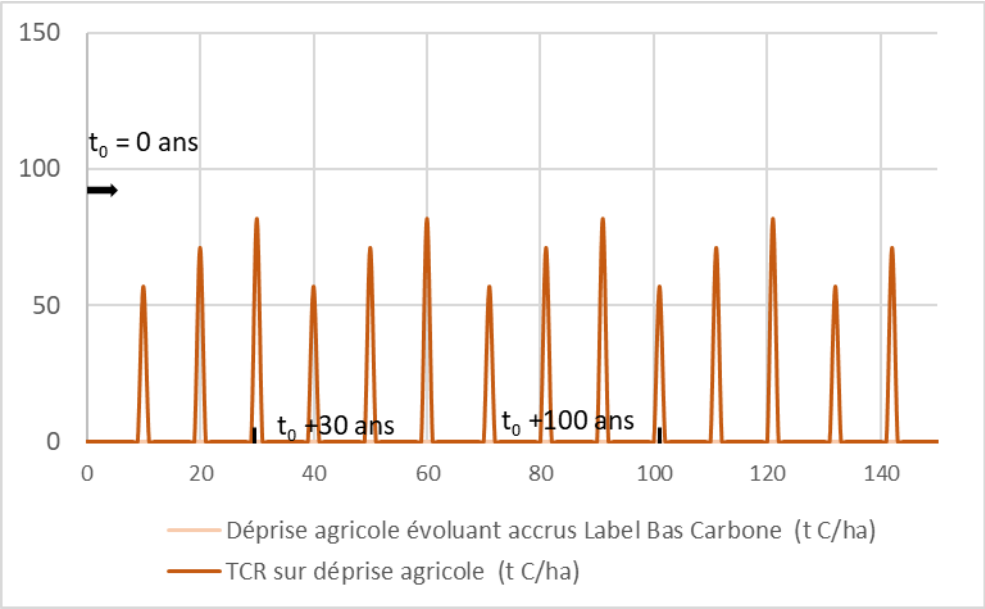
14.21.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 200 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Déprise_TCR_Label

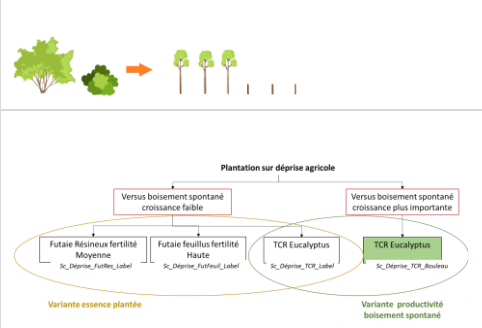


14.21.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 201 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Déprise_TCR_Label



14.22. Sc_Déprise_TCR_Bouleau



Sc_Deprise_TCR_Bouleau: Récolte arbre entier

- Scénario de référence :
  - Taillis de bouleau (accroissement de 3 m³ par an et par ha, atteinte une stabilité des stocks à 72 tC/ha de biomasse aérienne et souterraine).
- Scénario projet :
  - TCR Fertilité haute - production moyenne (bois for tige) : 22 m³/ha/an.
  - Révolution : 30 ans.
  - Récolte arbre entier : 100 % en énergie.

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 0 ans.

Tableau 184 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Déprise_TCR_Bouleau

	Unité	TCR sur déprise agricole	Déprise agricole évoluant vers taillis de bouleau
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	756	0
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	756	0
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2 310	0
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	24,4	0
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	24,4	0
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	23,1	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	192	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	192	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	587	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	6,19	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	6,19	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	5,87	0
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	812	186,2
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	812	186,2
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2 669	274
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	206	47,3
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	206	47,3
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	678	69,6
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	132	195

	Unité	TCR sur déprise agricole	Déprise agricole évoluant vers taillis de bouleau
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	135	73,1
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	133	168,0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	33,6	49,5
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	34,4	18,57
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	33,8	42,7

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	62,7	52,2
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	61,9	21,60
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	61,2	45,5
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	15,9	13,3
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	15,7	5,49
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	15,5	11,55

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	36,7	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	1,3	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	27,5	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	9,33	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	0	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	6,99	0

STOCKS en forêt - total

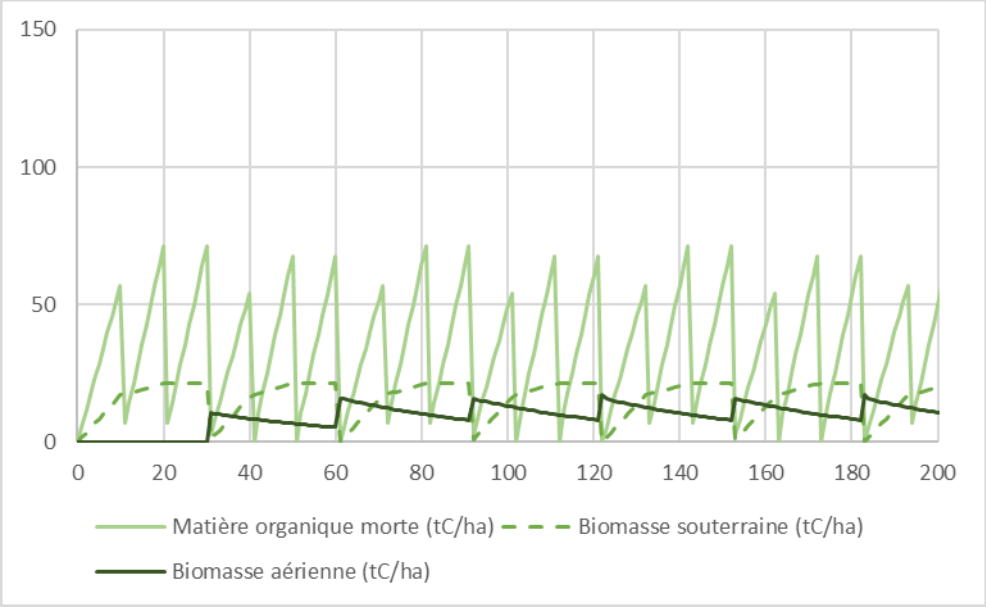
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	232	247
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	199	94,7
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	222	213,5
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	58,8	62,8
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	50,4	24,06
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	56,3	54,2

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	26,4	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	25,9	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	25,6	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	6,69	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	6,57	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	6,50	0

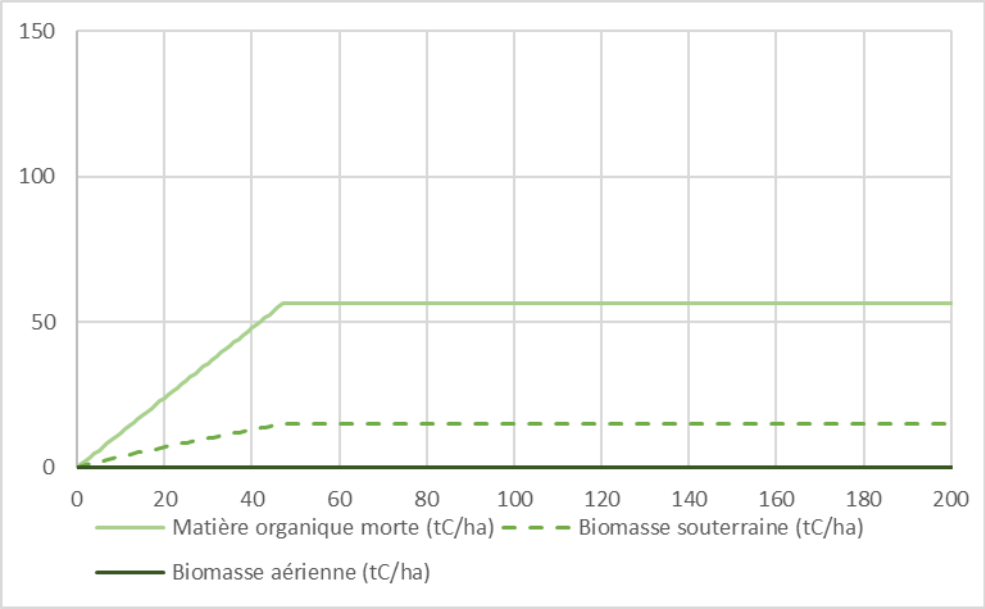
14.22.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 202 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Déprise_TCR_Bouleau



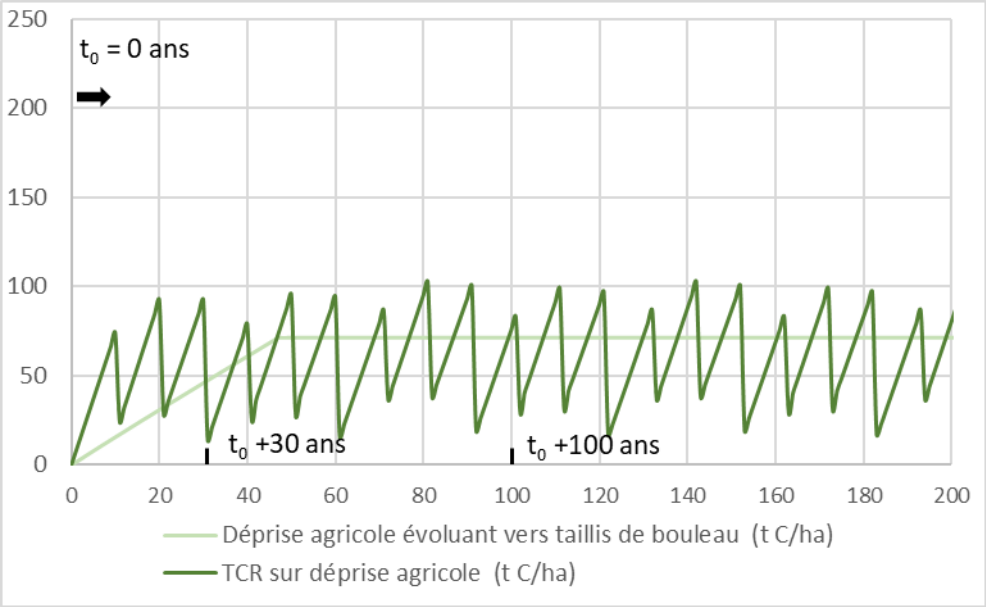
14.22.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 203 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_Déprise_TCR_Bouleau



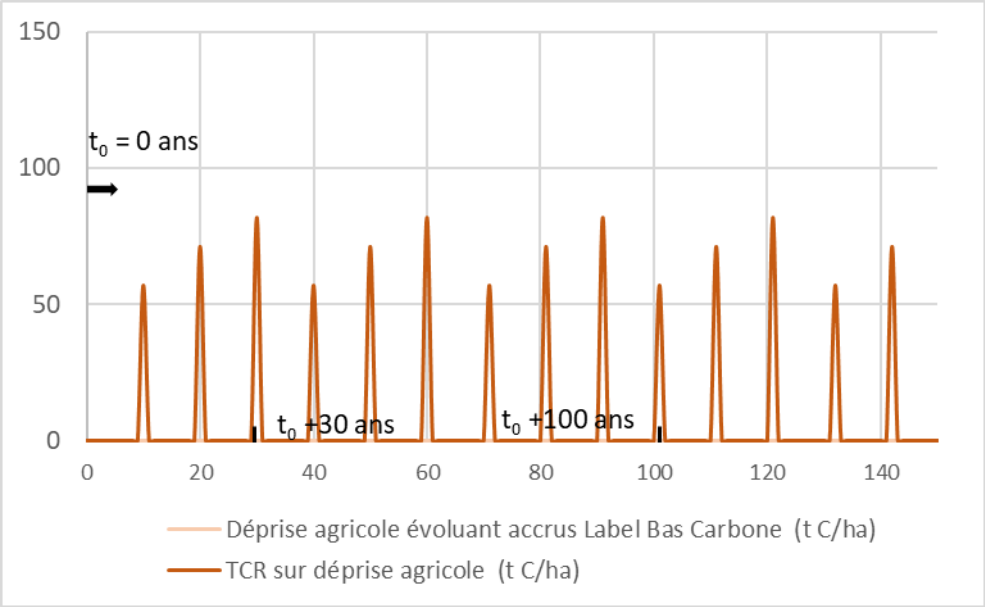
14.22.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 204 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Déprise_TCR_Bouleau

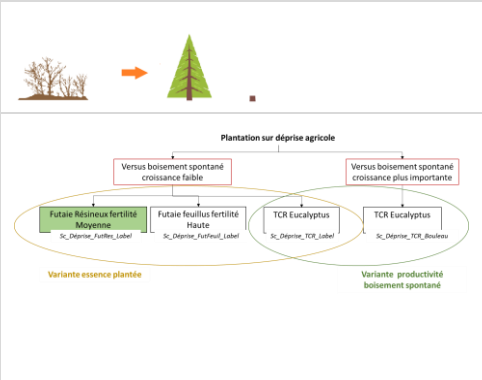


14.22.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 205 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Déprise_TCR_Bouleau



14.23. Sc_Déprise_FutRes_Label



Sc_Deprise_FutRes_Label : boisement par une futaie résineuse

- Scénario de référence :
  - Scénario de référence du Label bas-carbone (accroissement de 1 m³ par an et par ha).
- Scénario projet :
  - Futaie résineuse.
  - Fertilité moyenne à haute – Production moyenne (bois fort tige) : 19 m³/ha/an.
  - Révolution : 53 ans.
  - Utilisation : 39 % en bois énergie, 24 % en construction, 17 % en emballage, 9 % en papier, 5 % en ameublement et 6 % en utilisation interne à la filière (énergie pour le séchage).

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 0 ans.

Tableau 185 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Déprise_FutRes_Label

	Unité	Futaie résineuse sur déprise agricole	Déprise agricole évoluant accrus Label bas-carbone
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	819	0
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	72,7	0
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	1 129	0
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	15,4	0
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	2,42	0
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	11,3	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	210	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	20,1	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	288	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	3,95	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	0,670	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	2,88	0
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	1 147	107
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	531	61,4
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2 148	199
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	291	27,4
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	135	15,7
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	546	50,9
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	236	154
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	104	21,8

	Unité	Futaie résineuse sur déprise agricole	Déprise agricole évoluant accrus Label bas-carbone
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	217	76,5
Stock moyen sur 1 révolution (intégration sur la révolution)	*tC/ha*	*56,6*	*39,5*
Stock moyen sur 1 révolution /infini (CAT)	*tC/ha*	*59,9*	*59,9*
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	59,9	39,5
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	26,4	5,59
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	55,1	19,6

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	70,7	41,9
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	31,2	7,42
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	65,1	22,5
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	18,0	10,7
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	7,92	1,90
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	16,5	5,75

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	80,5	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	3,22	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	36,0	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	20,5	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	0,818	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	9,13	0

STOCKS en forêt - total

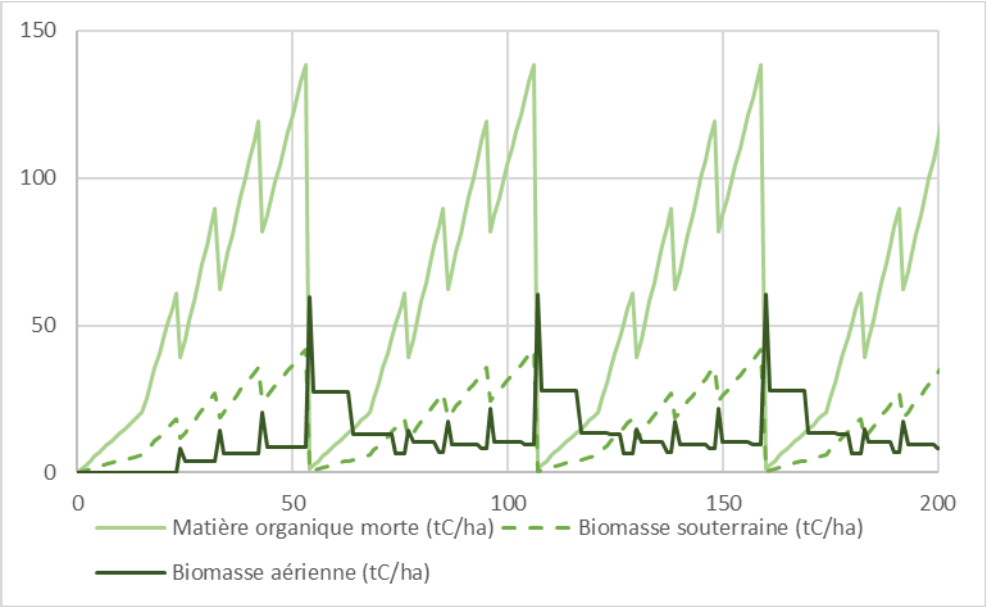
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	387	196
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	138	29,3
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	318	98,9
Stock moyen sur 1 révolution (intégration sur la révolution)	*tC/ha*	85,6	50,3
Stock moyen sur 1 révolution /infini (CAT)	*tC/ha*	98,3	103
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	98,3	50,3
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	35,1	7,49
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	80,8	25,3

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	273	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	6,59	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	160	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	69,4	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	1,67	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	40,7	0

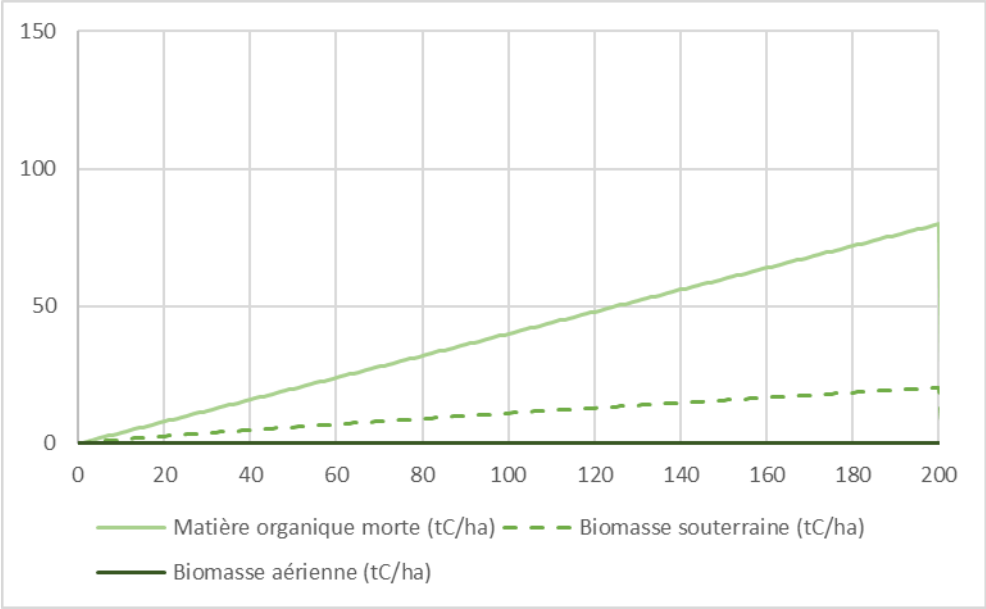
14.23.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 206 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Déprise_FutRes_Label



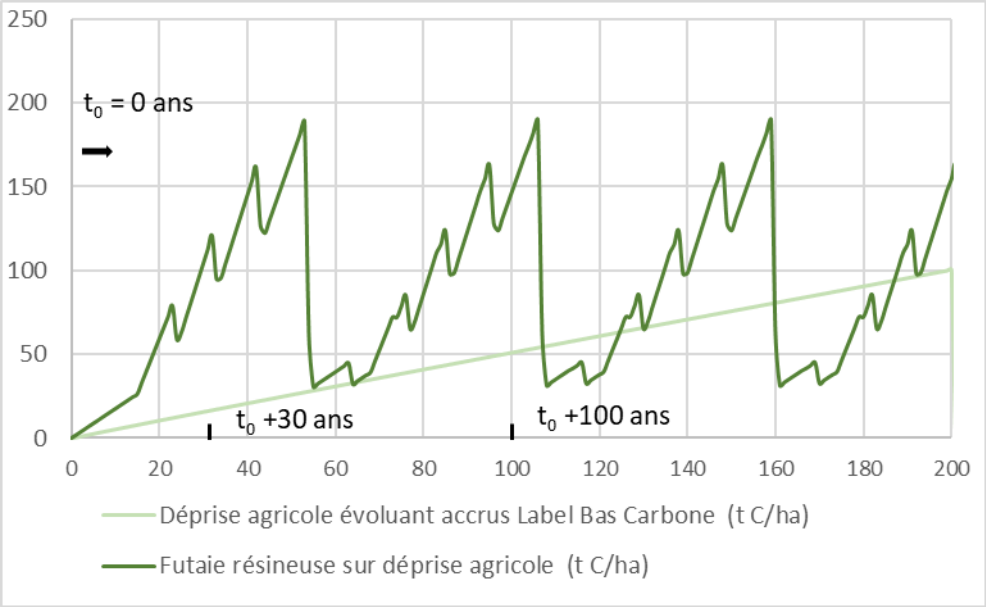
14.23.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 207 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_Déprise_FutRes_Label



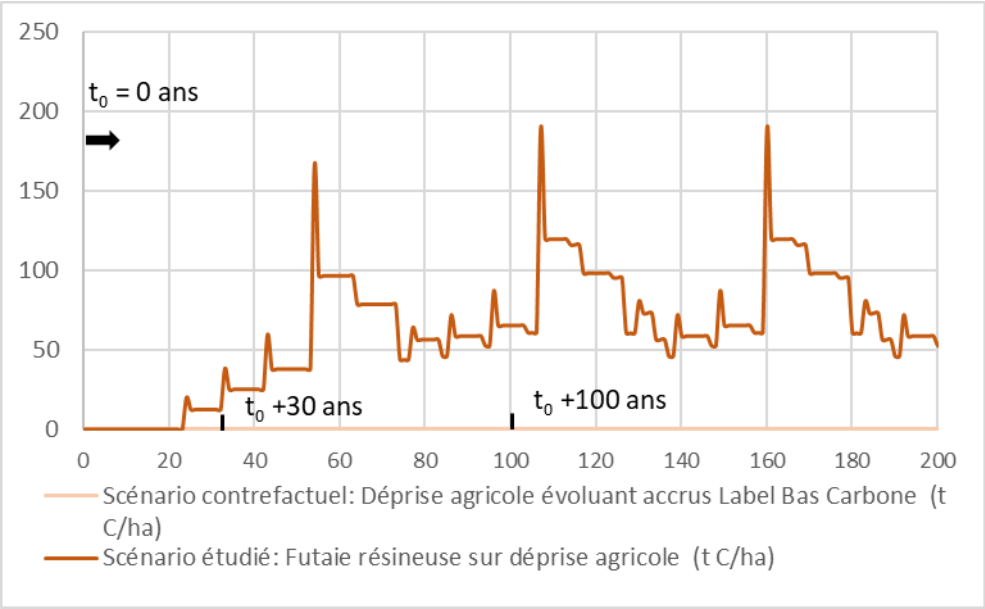
14.23.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 208 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Déprise_FutRes_Label

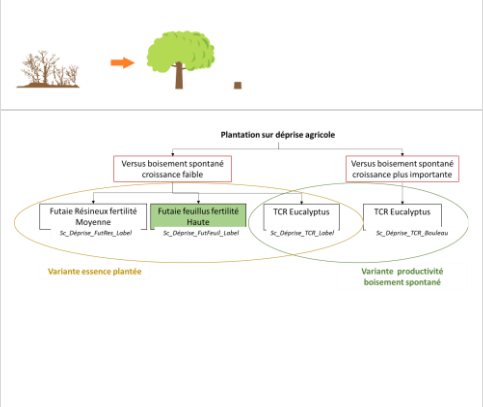


14.23.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 209 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Déprise_FutRes_Label



14.24. Sc_Déprise_FutFeuil_Label



Sc_Deprise_FutFeuil_Label : boisement par une futaie feuillue

- Scénario de référence :
  - Scénario de référence du Label bas-carbone (accroissement de 1 m³ par an et par ha).
- Scénario projet :
  - Futaie feuillue.
  - Fertilité haute – Production moyenne (bois fort tige) : 9 m³/ha/an.
  - Révolution : 170 ans.
  - Utilisation : 62 % en énergie, 11 % en construction, 10 % en ameublement, 8 % en papier, 4 % en emballage et 4 % en énergie interne à la filière (séchage). 70 % des menus bois sont récoltés pour l'énergie.

Le temps t0 à partir duquel les grandeurs suivantes sont calculées est 0 ans.

Tableau 186 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Déprise_FutFeuil_Label

	Unité	Futaie feuillue sur déprise agricole	Déprise agricole évoluant accrus Label bas-carbone
RECOLTE			
Volume total récolté par ha sur une révolution à partir de t0	m3/ha	1 892	0
Volume total récolté par ha sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	139	0
Volume total récolté par ha sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	689	0
Volume total récolté par ha et par an sur une révolution à partir de t0	m3/ha/an	11,1	0
Volume total récolté par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	m3/ha/an	4,64	0
Volume total récolté par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	m3/ha/an	6,89	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur une révolution à partir de t0	tC/ha	481	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	36,0	0
Masse totale de carbone récoltée par ha sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	176	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur une révolution à partir de t0	tC/ha/an	2,83	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 30 ans à partir de t0	tC/ha/an	1,20	0
Masse totale de carbone récoltée par ha et par an sur 100 ans à partir de t0	tC/ha/an	1,76	0
ACCROISSEMENT en forêt			
Accroissement sur une révolution à partir de t0	m3/ha	2 792	334
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	m3/ha	579	61,4
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	m3/ha	2 011	199
Accroissement sur une révolution à partir de t0	tC/ha	709	85,5
Accroissement sur 30 ans à partir de t0	tC/ha	147	15,7
Accroissement sur 100 ans à partir de t0	tC/ha	511	50,9
STOCKS en forêt - biomasse aérienne			
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	494	154
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	126	21,8

	Unité	Futaie feuillue sur déprise agricole	Déprise agricole évoluant accrus Label bas-carbone
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	398	76,5
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	125	39,5
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	32,1	5,59
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	101	19,6

STOCKS en forêt - biomasse souterraine

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	138	41,9
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	35,3	7,42
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	111	22,5
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	35,1	10,7
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	8,98	1,90
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	28,3	5,75

STOCKS en forêt - matière organique morte

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	180	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	14,6	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	73,1	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	45,8	0
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	3,72	0
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	18,6	0

STOCKS en forêt - total

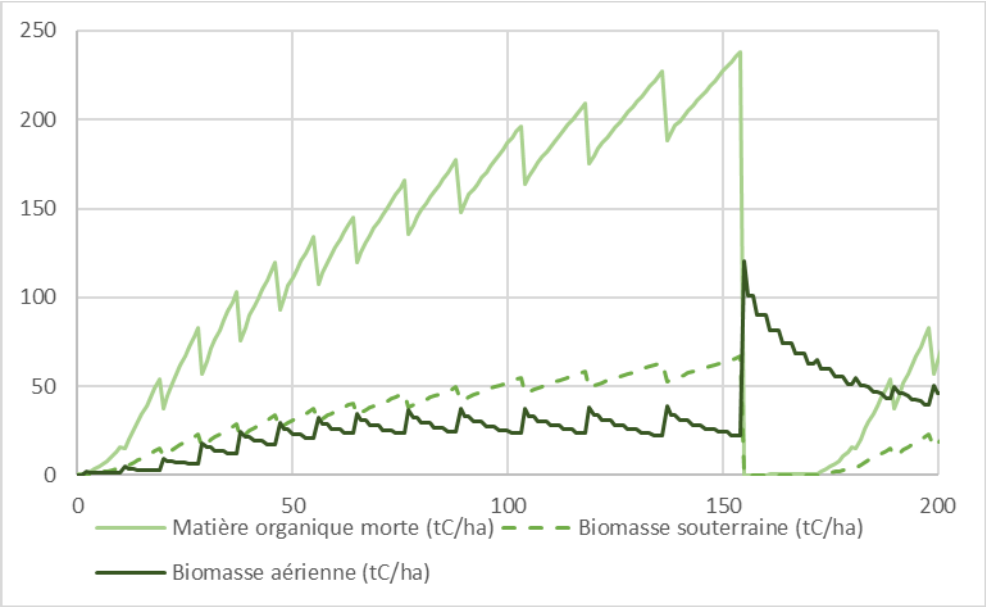
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	812	196
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	176	29,3
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	583	98,9
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	206	50,3
Stock moyen sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	44,7	7,49
Stock moyen sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	148	25,3

STOCKS dans les produits

Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	m3/ha	136	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	m3/ha	7,39	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	m3/ha	53,2	0
Stock moyen sur 1 révolution pour le scénario projet/ 200 ans pour le scénario de référence ("temps infini") - à partir de t0	tC/ha	34,6	0
Stock moyen dans les produits sur 30 ans - à partir de t0	tC/ha	1,88	0
Stock moyen dans les produits sur 100 ans - à partir de t0	tC/ha	13,5	0

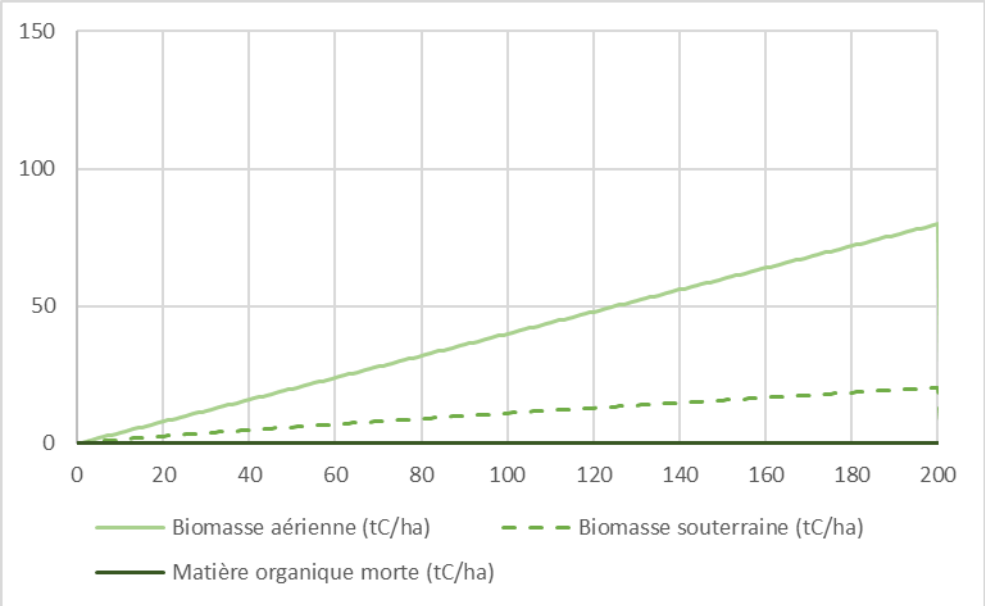
14.24.1. Détail du scénario projet (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 210 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Déprise_FutFeuil_Label



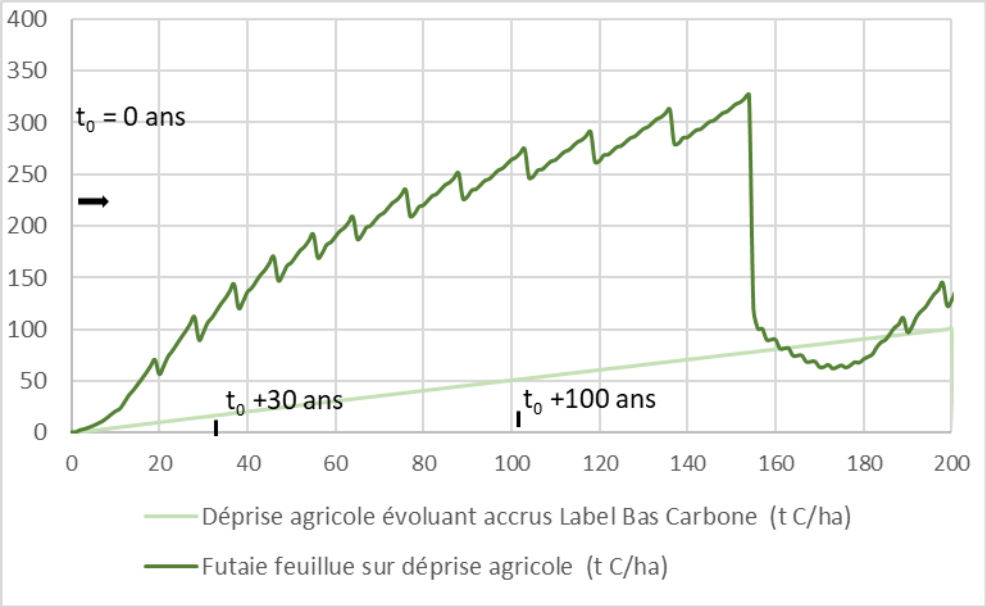
14.24.2. Détail du scénario de référence (biomasse aérienne, souterraine et matière organique morte)

Figure 211 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_Déprise_FutFeuil_Label



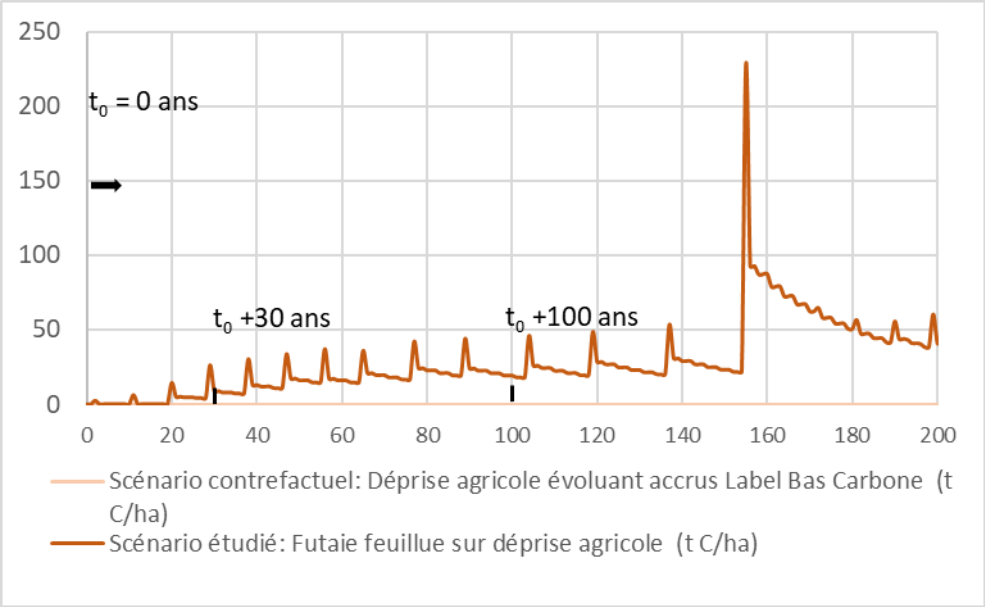
14.24.3. Stockage en forêt total pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 212 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Déprise_FutFeuil_Label



14.24.4. Stockage dans les produits pour le scénario projet et le scénario de référence

Figure 213 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Déprise_FutFeuil_Label



15. Annexe 15 : Résultats

Tableau 187 : Résultats pour l'ensemble des scénarios

		Variation de stocks (kg CO_2/MWh $_{th}$)		Variation de stocks (kg CO_2/m³)	
Nom scénario	Horizon de temps pour le calcul du stock moyen	Forêt	Produits	Forêt	Produits
Sc_Déprise_FutFeuil_Label	30 ans	- 401	-22,8	- 830	-47,2
Sc_Déprise_FutFeuil_Label	100 ans	- 301	-33,6	- 624	-69,7
Sc_Déprise_FutFeuil_Label	Régime permanent/ 1 révolution	- 115	-25,4	- 238	-52,7
Sc_Déprise_FutRes_Label	30 ans	- 534	-36,4	- 820	-55,9
Sc_Déprise_FutRes_Label	100 ans	-83,4	-61,7	- 128	-94,8
Sc_Déprise_FutRes_Label	Régime permanent/ 1 révolution	10,2	- 145	15,6	- 222
Sc_Déprise_TCR_Bouleau	30 ans	-61,3	-10,4	- 131	-22,2
Sc_Déprise_TCR_Bouleau	100 ans	-1,63	-4,84	-3,48	-10,3
Sc_Déprise_TCR_Bouleau	Régime permanent/ 1 révolution	8,91	-15,2	19,0	-32,5
Sc_Déprise_TCR_Label	30 ans	-92,7	-10,4	- 198	-22,2
Sc_Déprise_TCR_Label	100 ans	-23,3	-4,84	-49,6	-10,3
Sc_Déprise_TCR_Label	Régime permanent/ 1 révolution	-20,5	-15,2	-43,8	-32,5
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1	30 ans	63,9	-11,4	133	-23,7
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1	100 ans	24,2	-3,99	50,2	-8,27
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1	Régime permanent/ 1 révolution	18,2	0	37,7	0
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2	30 ans	36,5	-11,4	76	-23,7
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2	100 ans	13,1	-3,99	27,1	-8,27
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2	Régime permanent/ 1 révolution	10,4	6,93 E-09	21,6	1,44 E-08
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3	30 ans	88	-11,4	183	-23,7
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3	100 ans	35,5	-3,99	73,6	-8,27
Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3	Régime permanent/ 1 révolution	26,0	6,93 E-09	53,9	1,44 E-08
Sc_FutRes_Exploit_Houppier	30 ans	95,4	-16,2	147	-24,9
Sc_FutRes_Exploit_Houppier	100 ans	29,7	-4,50	45,7	-6,92
Sc_FutRes_Exploit_Houppier	Régime permanent/ 1 révolution	86,1	0	132	0
Sc_FutRes_Exploit_MB_1	30 ans	51,7	-16,2	79,4	-24,9
Sc_FutRes_Exploit_MB_1	100 ans	16,9	-4,50	25,9	-6,92
Sc_FutRes_Exploit_MB_1	Régime permanent/ 1 révolution	57,7	0	88,6	0
Sc_FutRes_Exploit_MB_2	30 ans	29,8	-16,2	45,7	-24,9
Sc_FutRes_Exploit_MB_2	100 ans	8,95	-4,50	13,8	-6,92
Sc_FutRes_Exploit_MB_2	Régime permanent/ 1 révolution	35,4	0	54,4	0
Sc_FutRes_Exploit_MB_3	30 ans	75,9	-16,2	117	-24,9
Sc_FutRes_Exploit_MB_3	100 ans	27,1	-4,50	41,6	-6,92
Sc_FutRes_Exploit_MB_3	Régime permanent/ 1 révolution	83,2	0	128	0
Sc_FutRes_Exploit_MB_4	30 ans	52,0	-16,2	79,9	-24,9
Sc_FutRes_Exploit_MB_4	100 ans	17,0	-4,50	26,2	-6,92
Sc_FutRes_Exploit_MB_4	Régime permanent/ 1 révolution	57,7	0,600	88,6	0,922
Sc_FutRes_Exploit_Souch_1	30 ans	152,8	-16,2	235	-24,9

Sc_FutRes_Exploit_Souch_1	100 ans	44,3	-4,50	68,0	-6,92
Sc_FutRes_Exploit_Souch_1	Régime permanent/ 1 révolution	119	0	182	0
Sc_FutRes_Exploit_Souch_2	30 ans	81,4	-16,2	125	-24,9
Sc_FutRes_Exploit_Souch_2	100 ans	22,6	-4,50	34,8	-6,92
Sc_FutRes_Exploit_Souch_2	Régime permanent/ 1 révolution	70,9	0	109	0
Sc_FutRes_Exploit_Souch_3	30 ans	213	-16,2	327	-24,9
Sc_FutRes_Exploit_Souch_3	100 ans	65,4	-4,50	100	-6,92
Sc_FutRes_Exploit_Souch_3	Régime permanent/ 1 révolution	166	0	256	0
Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio	30 ans	128	-14,6	261	-29,9
Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio	100 ans	62,1	-63,6	127	- 130
Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio	Régime permanent/ 1 révolution	93,2	- 175	190	- 358
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1	30 ans	206	-32,3	420	-66,0
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1	100 ans	75,6	-13,7	154	-28,0
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1	Régime permanent/ 1 révolution	309	-70,2	631	- 143
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3	30 ans	206	-78,9	420	- 161
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3	100 ans	75,6	-35,5	154	-72,5
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3	Régime permanent/ 1 révolution	309	- 187	631	- 382
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2	30 ans	353	-48,4	720	-98,7
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2	100 ans	141	-15,5	288	-31,7
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2	Régime permanent/ 1 révolution	323	-46,6	659	-95,1
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1	30 ans	217	-45,4	425	-88,9
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1	100 ans	1,45	-48,5	2,42	-80,9
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1	Régime permanent/ 1 révolution	-16,2	- 150	-29,5	- 273
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2	30 ans	271	-45,4	531	-88,9
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2	100 ans	39,4	-48,5	65,6	-80,9
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2	Régime permanent/ 1 révolution	74,8	- 150	136	- 273
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3	30 ans	167	-45,4	327	-88,9
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3	100 ans	-18,4	-48,5	-30,7	-80,9
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3	Régime permanent/ 1 révolution	-59,8	- 150	-27,5	-69,2
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4	30 ans	256	-42,3	504	-83,4
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4	100 ans	30,9	-45,5	52,6	-77,5
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4	Régime permanent/ 1 révolution	18,4	- 105	12,9	-73,7
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5	30 ans	225	-48,4	741	- 104
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5	100 ans	-91,3	-25,9	-90,4	-45,5
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5	Régime permanent/ 1 révolution	-71,5	-21,8	- 123	-37,4

16. Annexe 16 : Note sur l'impact sur le carbone du sol

16.1. Introduction

16.1.1. Objectifs

L'objectif initial du lot 2 du projet ACV BE est d'estimer les variations de stock de carbone dans l'ensemble des compartiments du réservoir de carbone des forêts (biomasse vivante et morte, litière, sol et produits bois) dans le cadre de différents scénarios sylvicoles produisant du bois énergie. Ces pratiques sylvicoles fictives sont comparées à des scénarii contrefactuels classiques.

L'estimation de la variation d'ordre de grandeur du stock de carbone biogénique dans le sol entre le scénario fictif et celui de référence constituera des éléments pour choisir les pratiques forestières maintenant ou diminuant le risque de déperdition du stock de matières organiques dans les écosystèmes forestiers. Il s'agit en somme de caractériser la quantité de carbone additionnel (positif ou négatif).

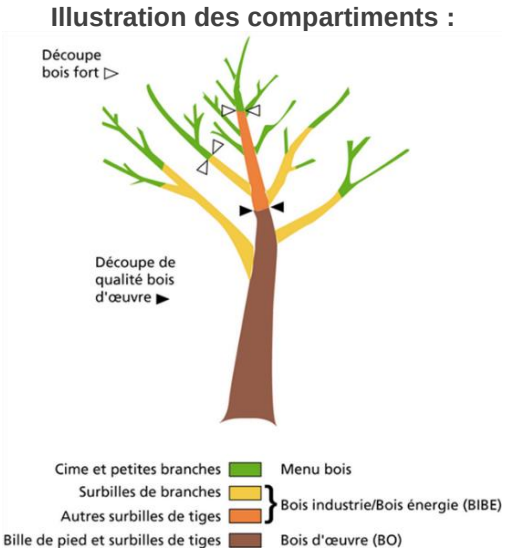
Mots clés : carbone, sylviculture, stock, sol.

16.1.2. Compartiments étudiés

Les différents compartiments modélisés par les modèles Excel ou CAPSIS utilisé sont :

- la biomasse aérienne (voir les différents sous-compartiments dans le graphe ci-dessous) ;
- la biomasse souterraine ;
- la matière organique morte ou bois mort.

Tableau 188 : Schéma des compartiments de l'arbre



Le bois mort peut se dégrader en CO_2 ou rejoindre le carbone du sol qui se décompose en :

- Litière ;
- sol minéral superficiel ;
- sol minéral profond.

En principe, la litière est un compartiment séparé du bois mort. Cependant il n'est pas aisé dans les différents articles de faire cette distinction.

16.1.3. Sélection des scénarii

Parmi l'ensemble des scénarios calculés dans lot 2, les scénarios suivants ont fait l'objet d'une évaluation de l'impact sur le stock de carbone dans le sol :

1. Transformation d'un taillis de châtaigner pour une futaie de douglas (révolution : 50 ans) : « Sc_Taillis_Mature_Transfo_1 »
    a. Récolte du scénario contrefactuel : Taillis non récolté
    b. Produits récoltés dans la futaie de douglas : BO + BIBE + Menu bois récoltés à 70 % (plaquettes)
2. Valorisation des menus bois d'une futaie résineuse de douglas : « Sc_FutRes_Exploit_MB_1 »
    a. Récolte du scénario contrefactuel : BO + BIBE
    b. Produits récoltés : BO + BIBE + 100 % Menu bois (plaquettes)

    Nom des scénarios :

3. Valorisation d'une futaie résineuse de douglas (50 ans) avec dessouchage : « Sc_FutRes_Exploit_Souch_1 »
    a. Récolte du scénario contrefactuel : BO + BIBE
    b. Produits récoltés : BO + BIBE + souches
4. Valorisation 3 d'une futaie résineuse de douglas : « Sc_FutRes_Exploit_MB_5 »
    a. Récolte du scénario contrefactuel : BO
    b. Produits récoltés : BO + BE (plaquettes) + 70 % MB
5. Valorisation 4 d'une futaie résineuse de douglas (50 ans) : « Sc_FutRes_Exploit_MB_4 »
    a. Récolte du scénario contrefactuel : BO + BIBE
    b. Produits récoltés : BO + BIBE+ 70 % MB
6. Valorisation d'une futaie de chênes (170 ans) : « Sc_FutFeuil_MB_1 »
    a. Récolte du scénario contrefactuel : BO + BIBE
    b. Produits récoltés : BO + BIBE + 100 % Menu bois (plaquettes)
7. Transformation du sol 1 d'un champ à un taillis courte rotation d'eucalyptus : « Sc_Déprise_TCR_Label »
    a. Récolte du scénario contrefactuel : NULL
    b. Produits récoltés : BE (plaquettes) + Menu bois (plaquettes)
8. Transformation du sol 2 d'un champ à une futaie résineuse de douglas (50 ans) : « Sc_Déprise_FutRes_Label »
    a. Récolte du scénario contrefactuel : NULL
    b. Produits récoltés : BO + BIBE + Menu bois (plaquettes)

16.1.4. Notion de carbone additionnel

L'objectif de l'étude est d'évaluer la récolte de bois énergie supplémentaire et d'évaluer l'impact de cette récolte par rapport à des scénarios correspondant aux pratiques actuelles. Cette démarche est cohérente par rapport à l''étude 4 pour 1000 :

Le carbone additionnel, définit dans l'étude 4 pour 1000 est caractérisé comme :

« Le stock simulé sous hypothèse de pratiques stockantes – le stock simulé sous hypothèses de maintien de pratiques actuelles. »

16.2. Catalogues des connaissances par étude

16.2.1. Articles scientifiques

(Gimmi et al., 2013)

Il est considéré que les feuilles contenues dans la litière se dégradent à 70 % dans l'atmosphère et migrent à 30 % dans le sol (Gimmi, 2012). Le carbone du sol se répartit à 98 % dans un cycle intermédiaire de dégradation (couche superficielle du sol) et à 2 % cycle lent de dégradation (couche profonde). Les demi-vie considérées pour ces différents compartiments (litière, cycle intermédiaire et cycle lent) sont : 2,85 ans, 33 ans, 1000 ans.

(Achat et al., 2015)

La gestion sylvicole influence le stockage de carbone dans le sol. Une récolte conventionnelle de bois diminue le stock de carbone dans le sol ; cet effet est contrebalancé par une accumulation de matière organique dans les couches profondes du sol, il faut donc prendre en compte l'horizon 0-100 cm.

Une récolte des rémanents va quant à elle, mener à une diminution signifiante du stock de C dans le sol (horizon 0-100 cm). Le transfert de C du sol vers l'atmosphère est estimé entre 142 et 497 tG C avec une récolte des rémanents au niveau européen.

- ✓ Prise en compte de la profondeur totale du sol et de l'effet cumulatif des horizons

Le graphe suivant présente les résultats de (Achat et al, 2015) pour deux types de récolte.

Tableau 189 : Illustration des pertes de carbone du sol liés à une récolte des rémanents (d'après (Achat et al, 2015)

Récolte intensive : Perte de 37% de carbone dans la litière et la 1ère couche minérale
Aucun effet compensatoire dans la profondeur du sol

Récolte conventionnelle : perte de 22% de carbone dans la litière
Carbone stable dans la 1ère couche minérale
Effet compensatoire dans la profondeur du sol

Note : la question de savoir si le bois mort est différent de la litière est importante ici. Si le bois mort fait partie de la litière alors, une partie de l'effet de déstockage est déjà pris en compte dans le fait que l'on compare une ré-émission immédiate (ramassage des menus bois et réémission immédiate du CO_2) par rapport à un stockage temporaire (demi-vie des menus bois : 5 ans).

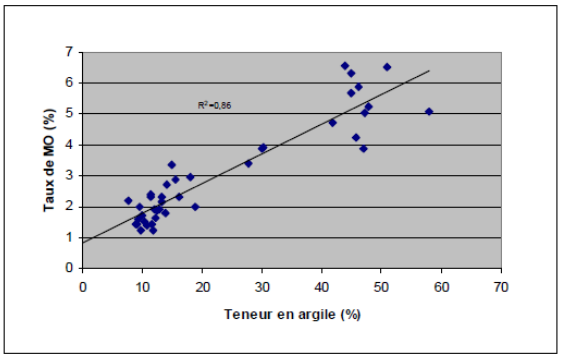
(Achat et al., 2018)

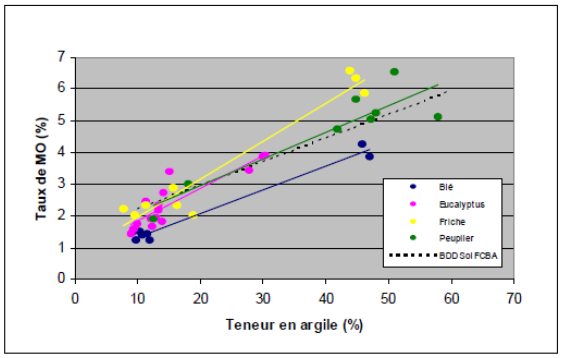
L'étude Achat et al. (2018), réalisée dans le cadre du projet EVAFORA montre une perte de 5 % du carbone du sol entre 2006 et 2100 que ce soit pour le pin maritime ou le douglas en itinéraire I1 par rapport à l'itinéraire standard. L'itinéraire I1 se définit pour ces 2 essences comme une récolte de la grume et des branches sans feuilles aux éclaircies et une récolte de la grume, des branches et du pivot racinaire lors de la coupe rase. Pour la variante I2 où les feuilles sont récoltées, la perte est légèrement supérieure, mais du même ordre de grandeur (5 %). Si l'on considère un stock de carbone moyen dans les sols de 70 tC/ha, l'émission correspond à 3,5 tC/ha à l'horizon 100 ans.

(Nguyen The, Berthelot, Charnet, & Fauconnier, 2008)

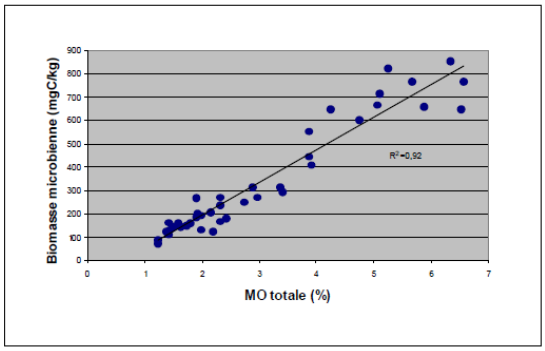
- Étude comparative sur le fonctionnement biologique des sols dans les cultures ligneuses

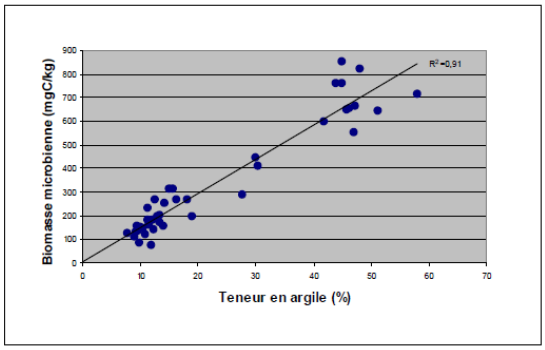
La quantité de matière organique (horizon 0-15 cm, sans litière) est dépendante de la quantité d'argile dans le sol. Par exemple, le peuplier, présent sur les terrains à texture argileuse, montre un stock de matière organique plus élevé que l'eucalyptus, planté dans des sols acides avec une faible teneur en argile.



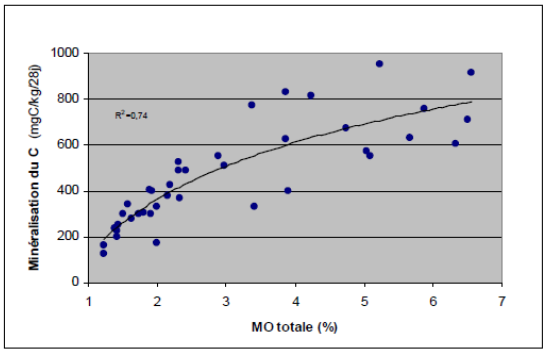


De la même façon, la quantité de biomasse microbienne est corrélée avec la teneur en argile.





La minéralisation est fonction dépendante du taux de MO du sol.



L'étude (Nguyen The, Berthelot, Charnet, & Fauconnier, 2008) s'est poursuivie par une évaluation de l'évolution de la quantité de carbone dans le sol d'une plantation d'eucalyptus par rapport à une friche ou une vigne. Cette évolution tend à montrer un enrichissement en matière organique.

16.2.2. Entretiens

Des entretiens téléphoniques ont été menés avec différents experts du carbone du sol et de la sylviculture :

Les conclusions de ces entretiens sont les suivantes :

- Lors d'une transformation (coupe, préparation du sol), une partie importante du carbone du sol (litière, horizons) est minéralisée ; cette quantité est difficile à estimer car elle dépend de plusieurs facteurs : (i) le stock initial, (ii) l'activité biologique, (iii) le contexte pédoclimatique, (iv) de la topographie (risque d'érosion), (v) des modalités de récolte (hors feuille) etc. (B. Zeller, INRA Nancy, L. Augusto, INRA Bordeaux),
- **Il est impossible de communiquer des données, chiffrées et fiables, pour chacun des scénarios étudiés.** L'état des connaissances ne le permet pas mais des travaux de recherche sont en cours. (Delphine Derrier, INRA Nancy, L. Augusto, INRA Bordeaux).
- Les éclaircies n'ont pas d'impact sur les sols forestiers (stock C) si l'intensité est basse et modérée. Les coupes rases ont des effets limités si le sol n'est pas perturbé, le dessouchage est une source de perturbation. (A. Berthelot, FCBA)
- Plus la durée de révolution est longue et moins les effets de la gestion se feront ressentir.(L.Augusto, INRA Nancy, A. Berthelot, FCBA).

16.2.3. Rapports

RESOBIO (Cecillon et al., 2017)

<u>Remarques diverses :</u>

Les feuilles baissent la qualité des plaquettes forestières.

Les souches sont enlevées en Aquitaine car le sol sableux favorise l'extraction et les débouchés commerciales existent dans cette région.

La récolte de menus bois diminue le stock de C dans le sol. La perte dans la litière est d'autant plus importante si les feuilles sont exportées.

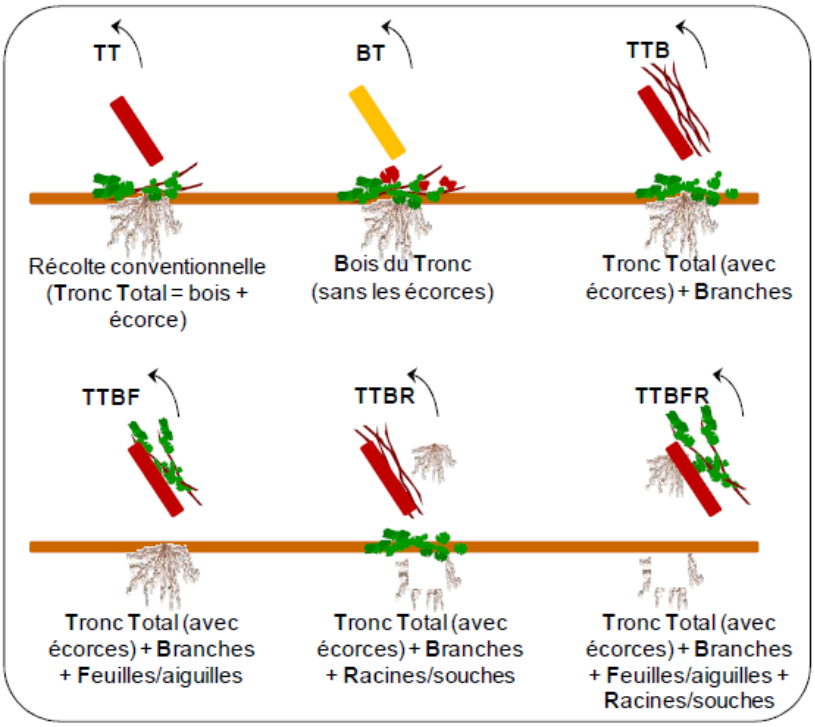
Sélection de scénarii :

Dans le projet RESOBIO, plusieurs scénarios sylvicoles (Tableau 190) ont été comparés par rapport à un itinéraire classique ; plusieurs impacts ont été étudiés dont l'exportation des éléments minéraux ainsi que le stock de matière organique dans les sols.

Le scénario TT où est prélevé seulement le tronc est la référence.

Les différents scénarios étudiés sont présentés ci-dessous (cf Tableau 188). Il est considéré que les branches sont de diamètre supérieur à 7 cm, c'est-à-dire les surbilles de tiges et de branches. Le compartiment feuilles/aiguilles comprend la cime et les menus bois. Le tronc total contient la grume principale (BO).

Tableau 190 : Scénarii étudiés dans RESOBIO



Quantification du carbone additionnel dans le sol :

Le rapport entre le « stock de carbone dans le sol issu d'un scénario testé » et le « stock de carbone dans le sol issu du scénario de référence » permet de visualiser l'impact de l'itinéraire sylvicole sur la variable étudiée, ici le stock de carbone dans le sol.

- Un rapport proche de la valeur 1 signifie que les impacts sont négligeables.
- Un rapport supérieur à 1 signifie que les impacts sont positifs.
- Un rapport inférieur à 1 signifie que les impacts sont négatifs.

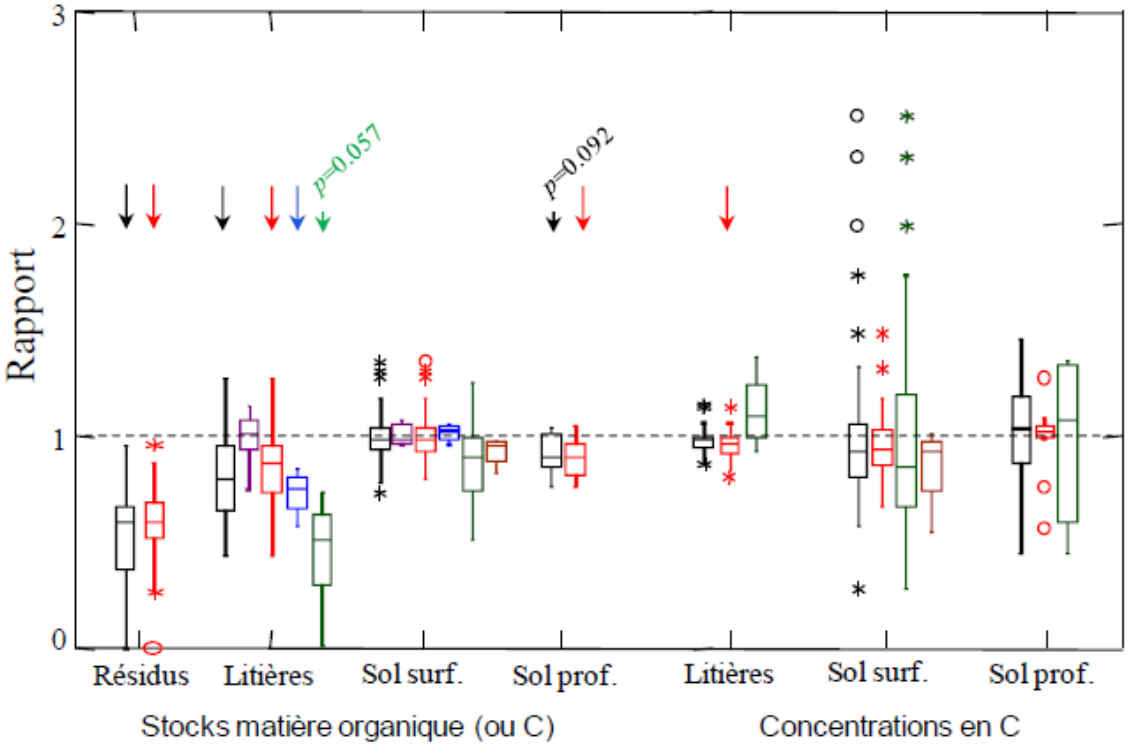
Dans le Tableau 191, sont visualisés les effets des scénarii par rapport au scénario de référence sur le stock de matière organique et la concentration de carbone pour les différents horizons du sol.

On peut noter que le scénario TTB (récolte du tronc total avec écorce + branches) n'induit pas de diminution significative du stock de C. En revanche, le scénario TTBF conduit à une perte des stocks de C de 40 % pour les résidus et 10% pour les litières et horizons profonds.

On remarque également que la diminution est d'autant plus importante quand les souches sont récoltées (TTBR/TTBFR) avec environ 25 % de perte de matière organique dans la litière.

Le prélèvement de l'arbre entier (produits tronc + branches + feuilles/aiguilles) avec le ramassage des débris / litière avant la coupe (TTBF+débris/litières) impactent fortement le stock de matière dans les différentes couches du sol, baisse jusqu'à 50 % de perte dans la litière et de 10 % dans l'horizon 0-20 cm. Cependant, TTBF+débris/litières participe à l'augmentation de la concentration de C dans le sol.

Tableau 191 : Impacts sur les stocks de matière organique (ou de carbone, en t/ha) et les concentrations en carbone (g/kg) en en fonction de l'horizon (couche de débris, litière, sol minéral de surface [0-20 cm], sol minéral profond [20-100 cm]). (Moyenne générale en noir, TTB en violet, TTBF en rouge, TTBR/TTBFR en bleu, TTBF+débris/litières en vert).



<u>Comparaison entre les scénarii de RESOBIO et ceux de l'ACV BE :</u>

Les scénarii contrefactuels de 2, 3, 5 et 6 inclus s'apparentent au TTB.

Concernant les pratiques fictives, les scénarios 2 et 6 s'apparente à TTBF. Le scénario 3 correspond à TTBR. Les scénarios 4 et 5 ne sont pas décrits dans l'étude.

Étant donné que le scénario TTB a un effet négligeable par rapport au TT, on va considérer que les rapports entre le stock de matière organique sous TT est égale au stock de matière organique sous TTB, ainsi les résultats de la figure 2 restent valables.

En conséquence, les scénarios 2 et 6 peuvent conduire à une perte matière organique de 10 % dans la litière ainsi que dans les sols profonds.

Le scénario 3 pourra entrainer une diminution de 25 % de stock de carbone dans la litière. Les scénarios 4 et 5 ne sont pas couverts dans l'étude.

Étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050 (Dhôte et al., 2017b)

Les sols forestiers mondiaux contiennent 50 à 80 % des stocks de carbone des sols c'est-à-dire 1200 Gt de C / 2400 Gt de C à l'échelle mondiale, hormis les zones humides et le permafrost.

Les forêts tempérées contiennent 258 Gt de C dans le sol et 48 GtC en biomasse sur pied, en moyenne le temps de résidence est de 23,5 ans.

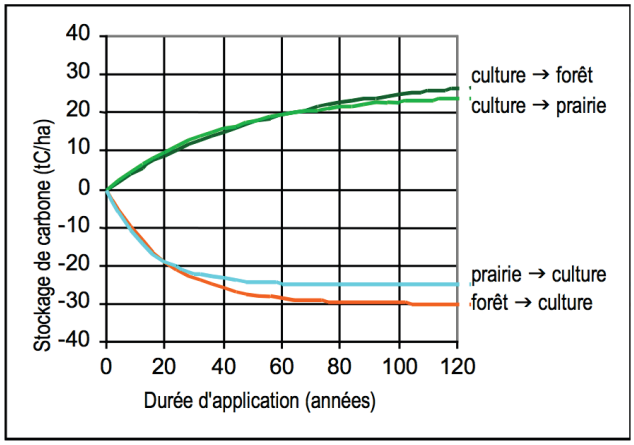
Rial et al (2016) ont démontré que le stock de C variait fortement selon les conditions climatiques (température, pluviométrie, index de continentalité et de thermicité et ombrothermie). La composition de la roche mère intervient dans ce processus car la présence de fer et d'aluminium participe à la formation de composés minéraux-organiques.

Plus le climat est chaud et sec et moins le carbone sera stocké facilement. Au contraire, le stock augmente avec l'altitude et dans les zones soumises à de nombreuses précipitations.

<u>Evolution des stocks avec les usages du sol :</u>

La dynamique de reconstitution des stocks dépend de l'utilisation des sols. Ainsi une forêt massivement exploitée entraine un appauvrissement de la quantité de matière organique dans le sol. Ces pertes dépendent de l'accessibilité des sites.

Tableau 192 : Evolution du stock de carbone dans le sol associé aux pratiques provoquant le stockage ou déstockage extrême (INRA, IGN, 2017)



Flux de carbone : entrée, sortie et temps de résidence :

Le temps de résidence est la durée entre l'entrée et la sortie du carbone dans le sol.

Les entrées se font sous forme d'apports extérieurs en biomasse (feuilles, branches, racines) et par des apports souterrains (racines, souches).

La sortie est dû au lessivage, drainage des sols et la minéralisation (production de CO_2). L'action de décomposeurs de sols est difficilement traçable.

Pour un état stationnaire (flux d'entrée = flux de sortie), le temps de résidence moyen dans un contexte de forêt tempérée serait de 23,5 ans.

Pour tous les biomes confondus, l'âge moyen du carbone dans les sols serait de 30 ans à 10 cm de profondeur et de 300 ans à 40 cm de profondeur.

Impact des pratiques de gestion sur l'évolution des stocks de carbone dans les sols forestiers :

Sans nécessairement changer de système de production, l'augmentation de la densité (forêts denses : >75% du couvert) ainsi que l'allongement de la durée de révolution alimentent les quantités de matières organiques dans le sol.

Pratiques favorisant le stockage

Les résineux créant des milieux plus acides, limitent l'activité des décomposeurs de sol et donc la dégradation des éléments organiques. Ainsi, par rapport aux feuillus (Ph élevé), les stocks de carbones dans les horizons organiques uniquement sous les confères ont tendance à être plus important. La variabilité dans les horizons minéraux est due au type de sol.

Galka et al (2013) modélisent le remplacement de peuplements purs de Picea abies contre des peuplements mixtes de Fagus sylvatica – Picea abies ; la perte de carbone dans les sols avoisinerait 10% dans l'horizon 0-20 cm.

Cindy Prescott préconise d'augmenter le transfert de carbone des horizons organiques vers les horizons minéraux plus profonds sous des formes stabilisées (composé organo-minérales, composé récalcitrant). Ainsi, le mélange de peuplements mixtes résineux / feuillus favoriseraient le stockage de carbone dans le sol tout en limitant l'acidification des sols et en maintenant un humus de type mull. Les 3 types d'humus sont :

(i) Type moder : reconnaissable à l'accumulation en surface de litières à différents stades de décomposition, sol acide, décomposition lente.
(ii) Type mull : sol brun, fertile, pH élevé, litière fine en surface car très vite dégradée.
(iii) Type mor : grosse accumulation de litière, activité biologique basse, zone pauvre.

Un environnement de type mull encourage les échanges de carbone entre l'horizon organique et minéraux. Les résineux captent plus de carbone dans la couche organique, cependant cette forme est soumise aux aléas anthropiques et est donc par nature instable. Le carbone qui est en profondeur est quant à lui, plus stable.

Le réseau RENECOFOR a permis d'estimer sur 15 ans que les feuillus stockaient 0,19 tC/ha/an et les résineux 0,49 tC/ha/an dans le sol soit 15 $MtCO_{2eq}$/an au niveau national (couches holorganiques + 40 premiers cm du sol minéral).

Ces chiffres sont à manipuler avec précaution étant donné que le réseau ne représente pas la réalité de la diversité des forêts en France. L'étude a pris comme valeur moyenne, un peu moins de la moitié de la valeur nationale soit 7,25 $MtCO_{2eq}$/an (au lieu de 15 $MtCO_{2eq}$/an). Nous pourrons faire de même pour extrapoler ces résultats à la métropole, soit un stockage C de 0,09 tC/ha/an pour les feuillus et de 0,24 tC/ha/an pour les résineux**.**

Enfin, l'apport d'azote par amendement entraîne une augmentation des stocks de C.

Pratiques défavorisant le stockage

Les travaux du sol avant plantation ainsi qu'un prélèvement des rémanents défavorisent l'accumulation de carbone. Une sylviculture standard a peu d'impact sur le stock de C, si on prend en compte l'ensemble du profil du sol (Achat et al.). En effet, la dégradation du système racinaire dissous du carbone dans les horizons minéraux ; les travaux forestiers incorporent mécaniquement la matière organique aux horizons profonds. Le stock de carbone initial est recouvré au bout de 40 ans. En revanche, une sylviculture incluant la récolte des rémanents ne permettra pas de retrouver l'état du stock initial dans le même temps que pour un itinéraire sylvicole standard.

Picaso (Cecillon et al., 2017)

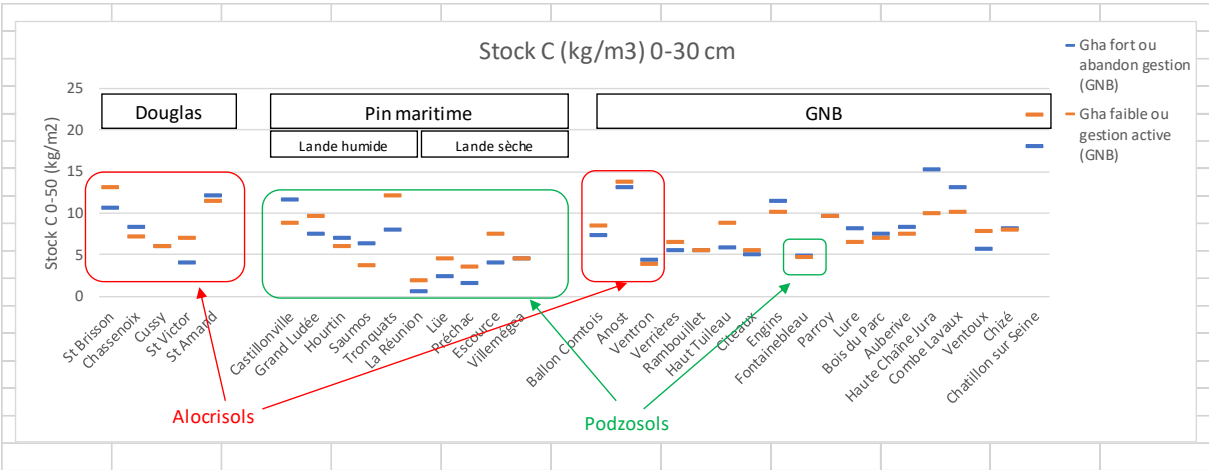
Note personnelle de (Berthelot, 2019)

Objectif de l'étude :

Il s'agissait d'échantillonner les stocks de COS dans le réseau GNB (Gestion, Naturalité, Biodiversité), dans des dispositifs expérimentaux (ayant des modalités tranchées) gérés plus intensivement de Douglas (FCBA, GIS Coop), pin maritime (FCBA, Gis Coop) et peuplier (FCBA).

Le mode de gestion (éclaircies fortes ou parcelles témoins sans éclaircie) n'influence pas le stock de C du sol (pas démontrable statistiquement compte-tenu de la grande variabilité spatiale du stock de C). Les stocks de C sont en revanche très site-dépendant (en lien avec le type de sol).

À type de sol équivalent, les stocks de C dans le sol sont très variables d'un site à l'autre, mais que la gestion ne semble pas intervenir. C'est bien le site (type de sol, historique, etc.) qui influence le stock de C du sol, beaucoup plus que le mode de gestion ou l'essence.



Étude 4 pour 1000 (Pellerin et al., 2019)

Objectif de l'étude :

Afin de ne pas passer sous la courbe **des 2°c** et d'atteindre la **neutralité carbone en 2050**, il va falloir diviser par 4 nos émissions des gaz à effet de serre (GES).

La forêt et l'agriculture ont des rôles stratégiques dans la réalisation de ce plan ambitieux au travers de la substitution et de la séquestration.

L'objectif de stocker 4 ‰ de carbone additionnel par an permettrait de compenser les émissions anthropiques.

Calcul simple :

Stock de carbone mondial dans l'horizon 0-100 cm : 2 400 GtC

Total des émissions GES humaines mondiales : 9,4 GtC

Soit 0,4 % ou 4 ‰ du stock de carbone mondial

La simplicité de ce chiffrage suscite de nombreuses controverses (apparition de nouvelles méthodes, Etc.).

Le carbone additionnel qui est caractérisé dans l'étude se définit comme :

« Le stock simulé sous hypothèse de pratiques stockantes – le stock simulé sous hypothèses de maintien de pratiques actuelles. »

L'étude 4 pour 1000 se voulait de :

- quantifier le potentiel de stockage de carbone additionnel dans les sols ;
- identifier les pratiques agronomiques et sylvicoles stockantes ;
- évaluer et la réalité technico-économique de ces pratiques ;
- évaluer les effets sur d'autres variables d'intérêt (nitrate, phosphore…) ;
- identifier les synergies entre les politiques publiques.

Stock de carbone dans les sols :

En France, le stock de carbone dans l'horizon 0-30 cm est de 3 580 MtC et de 6,08 GtC dans l'horizon 0-100 cm. (Mulder et al. 2016).

Le carbone le plus stable est d'origine microbienne, le stock est plus élevé en altitude et diminue en plaine.

Les forêts contiennent 38 % du stock de carbone avec une moyenne de 81 t/ha. Il s'agit du stock le plus important suivi par les prairies permanentes avec une représentativité de 22 %.

Les quotas de carbone étant déjà élevés dans les milieux forestiers, aucune pratique sylvicole stockante ne semble ressortir dans la littérature. Il est conseiller de maintenir le tendanciel actuel et d'augmenter là où les stocks sont faibles, c'est-à-dire en grandes cultures majoritairement. Une nuance a été faite cependant par Laurent AGUSTO sur le fait qu'il manquait des éléments pour appuyer qu'il y avait des pratiques sylvicoles stockantes mais que par prudence, ils ne se sont pas épanchés là-dessus.

Les pratiques agricoles retenues sont : (i) l'extension de culture intermédiaire ; (ii) le semis direct ; (iii) les nouvelles ressources organiques ; (iv) l'insertion et l'allongement de prairies intermédiaires ; (v) Agroforesterie inter parcellaire ; (vi) Haies ; (vii) Remplacement fauche-pâture ; (viii) intensification modérée en prairie permanente.

Il y a un potentiel de stockage de carbone additionnel de :

- 5,78 MtC/an dans l'horizon 0-30 cm ;
- 8,43 MtC/an extrapolé dans toute la profondeur de sol.

L'adoption de pratiques stockantes pourrait compenser jusqu'à 6,8 % des émissions des GES nationale et 41 % des GES agricoles.

L'essentiel des possibilités de stockages sont dans les grandes cultures.

Les pratiques contribuant le plus au stockage de carbone additionnel sont :

- l'expansion des cultures intermédiaires à hauteur de 35 % ;

- l'agroforesterie inter parcellaire à hauteur de 19 % ;
- le développement de prairies temporaires.

Le réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS) échantillonne 2 240 sites en France.

Stock de carbone sous différents modes d'occupation des sols (p 32 de la synthèse de l'étude, version du 13 juin 2019).

Stock C organique (tC/ha)	min	moy	médiane	max	Écart-type
Sous-forêts	6,87	81,0	73,4	230	34,4
Sous prairies permanentes	18,1	84,6	78,3	309	35,0
Sous grandes cultures	9,92	51,6	47,9	137	16,2

Le stock de C (tC/ha) sous forêt est compris entre 6,87 et 73,4 –moyenne à 81 tC/ha.

Il est très difficile de quantifier précisément les stocks de C sous les forêts, vu la quantité de facteurs à prendre en compte.

Effet de changement d'occupation des sols :

L'afforestation des sols arables entraine une augmentation du C dans la litière et les couches minérales, permet de constituer un puit de carbone avec :

Couche 0-20 cm : 460 kgC/ha/an

Couche 20-40 cm : 150 kgC/ha/an

Couche 40-60 cm : 90 kgC/ha/an

Couche + 60 cm : 50 kG/ha/an

Gerboise (G. Landmann et al., 2019)

Le rapport Gerboise, rapporte un ensemble de bonnes pratiques pour une récolte durable de bois énergie. Les 3 enseignements principales à tirer sont :

(i) Limiter l'évacuation des feuilles (particulièrement riche en nutriments) lors des opérations de récolte.
(ii) Laisser 10 à 30 % des menus bois sur place.

La récolte est déconseillée, sauf compensation, pour les sols les plus vulnérables et dans les zones prioritaires sur le plan de la biodiversité.

(iii) Raisonner la récolte des souches

EVAFORA (Martel et al., 2018)

Le projet EVAFORA a notamment étudié les variations de stock de carbone dans le sol causées par la récolte des menus bois. Pour le scénario RCP 2,6, la variation de carbone entre le scénario où les menus bois sont ramassés et le scénario où seuls les troncs sont ramassés est égale à 1,77 tC/ha à l'horizon 2050 et 2,9 tC/ha à l'horizon 2100.

16.3. Discussion

L'objet de cette synthèse bibliographique, qui est non exhaustive, était d'établir pour différents scénarios sylvicoles, quel serait l'impact de la gestion sylvicole sur le stock de carbone dans les sols forestiers.

Les entretiens réalisés ont démontré qu'ils étaient impossibles de répondre de manière précise, tant les paramètres à prendre en compte sont nombreux. En revanche, il est possible de s'appuyer sur la littérature scientifique et les dires d'expert pour donner un avis qualitatif sur les effets (positifs ou négatifs) des scénarios sylvicoles sur le stock de matière organique dans le sol.

16.3.1. Avis général qualitatif par scénario

Pour le **scénario «** Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1 **»**, le fait de passer d'une exploitation en taillis à révolution courte (20 ans) à une révolution de 50 ans, est bénéfique pour la restauration de la matière organique des sols. Cependant, il est possible que cette augmentation du stock serait moins importante par rapport au taillis laissé à l'abandon qui est le scénario de référence. Lors de la transformation de la parcelle, le travail du sol aura un impact négatif à court terme mais le stock initial aura le temps de se reconstituer avant la première coupe, la durée de recouvrement est en moyenne de 40 ans (Dhôte et al., 2017b). De plus, la densification du peuplement sera un facteur favorable à l'apport de C dans le sol à long terme (Dhôte et al., 2017b). Le couvert forestier étant plus fourni, cela limitera la minéralisation. Par ailleurs, les résineux stockent plus de carbone dans le sol que les feuillus (Dhôte et al., 2017b) ; Le scénario intègre la prise en compte de la vulnérabilité du sol et une partie des menus bois ainsi que la totalité des feuilles sont laissées sur place ce qui ne devrait donc pas affecter le carbone sol (Achat et al., 2015). Il est difficile de conclure sur l'impact de la transformation sur le long terme.

Le **scénario «** Sc_FutRes_Exploit_MB_1 **» est pénalisant** étant donné que 100% des MB sont exportés selon (Achat et al, 2015). L'étude Achat et al. (2018), réalisée dans le cadre du projet EVAFORA montre une perte de 5 % du carbone du sol entre 2006 et 2100 que ce soit pour le pin maritime ou le douglas en itinéraire I1 par rapport à l'itinéraire standard. Si l'on considère un stock moyen de carbone de 70 tC/ha, l'émission est estimée à 3,5 tC/ha à 100 ans (émission proche des calculs présentés dans (Martel et al., 2018)).

Le **scénario «** Sc_FutRes_Exploit_Souch_1 **»** est source de perturbations pour le sol en récoltant systématiquement les souches. Les souches représentent environ 10 % de la biomasse, de plus, la plus-value économique n'est pas garantie au vu du coût des travaux d'exploitation forestière. On fait cependant l'hypothèse que seul 50 % de la souche est exportée. Ce scénario pourrait entrainer une diminution de 25 % de stock de carbone dans la litière (Guy Landmann & Nivet, 2014)(il faudrait vérifier si il n'y a pas de double compte).

Dans les scénarios « Sc_FutRes_Exploit_MB_4 **» et «** Sc_FutRes_Exploit_Houppier **»**, il est fait l'hypothèse d'une gestion raisonnée des MB. Selon (Achat et al., 2015) la sylviculture sans récolte des menus bois n'entraîne pas de perte de carbone dans le sol. L'hypothèse est faite ici que la gestion raisonnée des menus bois n'entraine pas non plus de baisse du stock de carbone. Si l'on considère que cette publication compare la récolte de tout le houppier par rapport à la récolte du tronc seul, on peut estimer cependant une perte pouvant aller jusqu'à 2,8 tC/ha (Martel et al., 2018)

La longue durée de révolution du « Sc_FutFeuil_MB_1 **»** favorise le gain de matière organique dans sol, en effet, plus les éclaircies sont espacées, moins l'impact à long terme se fait ressentir selon les interviews menées. Cependant, il est fait l'hypothèse que 100 % des MB sont exportés : il y a donc un risque potentiel sur le stock de carbone du sol et les chiffres utilisés pour le scénario **«** Sc_FutRes_Exploit_MB_1 **»** pourraient être utilisés.

Les **scénarii** « Sc_Déprise_TCR_Label **» et «** Sc_Déprise_FutRes_Label **»** font l'objet d'une afforestation de terres arables. Ces deux cas de figures permettent une densification du couvert donc une source limitant la minéralisation du C. La durée de rotation d'un TCR étant de 10-15 ans, le scénario 5 permettrait un apport supplémentaire de 5 à 8 tC/ha (INRA, IGN, 2017). Aussi, il a été montré dans le projet Picaso (Cecillon et al., 2017) que l'eucalyptus ne présentait pas de risque de stériliser les sols.

Quant au scénario **«** Sc_Déprise_FutRes_Label **»**, la transformation d'un champ en une futaie de douglas, pourrait créer un apport de 17 tC/ha (Dhôte et al., 2017b).

La question se pose du gain en carbone par rapport à un boisement naturel, ce qui explique que ces éléments n'ont pas été intégrés à l'évaluation de l'impact de carbone du sol dans l'étude.

Ces chiffres sont indicatifs et n'ont pas l'ambition d'être exacts.

16.3.2. Conclusion, limites de l'étude

Ce travail de synthèse ne se veut pas exhaustif, la littérature existante ne se limite pas aux articles étudiés. La quantité de carbone dans les sols dépend de nombreux facteurs : de l'état initial du stock, de l'historique de la parcelle, du type de sol et de ses propriétés, des conditions pédoclimatiques, de la topographie et enfin de la gestion sylvicole. Le projet Picaso (Cecillon et al., 2017) mettait en avant qu'à type de sol équivalent, les stocks de matières organiques sont très variables d'un site à l'autre. La quantité de matière organique est fortement dépendante de la quantité d'argile dans le sol. Par exemple, le peuplier, présent sur les terrains à texture argileuse, montre un stock de matière organique plus élevé que l'eucalyptus, planté dans des sols acides avec une faible teneur en argile (Nguyen The et al., 2008). Bien que la gestion ne semble pas ou peu intervenir, (Achat et al., 2015) ont montré qu'une récolte des rémanents pouvait causer jusqu'à la perte de 37% de carbone dans la litière et la 1ère couche minérale, et ce sans effet compensatoire d'accumulation de matière organique dans les horizons les plus profonds. Deux pratiques pouvant être impactantes : une coupe rase associée à un travail de sol a un

impact à court terme (non estimée dans l'étude) et la récolte des souches et de la totalité des menus bois (estimée dans l'étude).

Ainsi, la sylviculture influence le stock de carbone dans le sol, pour autant ce n'est ni la seule variable à prendre en compte ni la plus impactante. Il est donc difficile d'établir de quantifier le carbone additionnel en extrapolant des situations fictives. Toutefois, des modélisations sont en cours de développement pour arriver à de tels résultats (INRA).

17. Annexe 17 : Liste des scénarios

Tableau 193 : Synthèse des scénarios étudiés et des scénarios de référence correspondant

Nom du scénario	Nouveau scénario			Scénario de référence
	Itinéraire	*Classe de fertilité*	*Produits récoltés*	
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1: Exploitation d'un taillis en croissance de fertilité haute	Taillis feuillu	Haute	BE 70 %, Piquets 30 %, MB (70 %)	Taillis non exploité de fertilité haute croissant puis dépérissant (-35 %)
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2: Exploitation d'un taillis en croissance de fertilité moyenne	Taillis feuillu	Moyenne	BE 70 %, Piquets 30 %, MB (70 %)	Taillis non exploité de fertilité basse croissant puis dépérissant (-35 %)
Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3: Exploitation d'un taillis de fertilité haute en croissance - variante utilisation matériau	Taillis feuillu	Haute	BE 25 %, Piquets 65 %, BO 5 %, MB (70 %)	Taillis non exploité de fertilité haute croissant puis dépérissant (-35 %)
Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio : Amélioration d'un taillis en croissance	Futaie feuillue	Haute	Eclaircie 2 et 3: 73 % BE, 27 % BO, coupe finale: 9 % BE, 91 % BO, MB (70 %)	Taillis non exploité de fertilité haute croissant puis dépérissant (-35 %)
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1 : Transformation d'un taillis capitalisé (mature) dépérissant (-35%) en futaie de douglas de fertilité moyenne à haute	Futaie résineuse	Moyenne	BO+ BIBE + MB (70 %)	Taillis non exploité de fertilité haute dépérissant (-35 %)
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2 : Transformation d'un taillis capitalisé (mature) à l'équilibre en futaie de douglas de fertilité moyenne à haute	Futaie résineuse	Moyenne	BO+ BIBE + MB (70 %)	Taillis non exploité de fertilité haute à l'équilibre
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3 : Transformation d'un taillis capitalisé (mature) fortement dépérissant (-50%) en futaie résineuse de fertilité moyenne à haute	Futaie résineuse	Moyenne	BO+ BIBE + MB (70 %)	Taillis non exploité de fertilité haute fortement dépérissant (-50 %)
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4 : Transformation d'un taillis capitalisé (mature) dépérissant (-35%) en futaie résineuse Douglas de fertilité basse à moyenne	Futaie résineuse	Basse	BO+ BIBE+ MB (70 %)	Taillis non exploité de fertilité haute dépérissant (-35 %)
Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5: Transformation d'un taillis capitalisé (mature) dépérissant (-35%) en futaie feuillue de fertilité haute	Futaie feuillue	Haute	BO+ BIBE + MB (70 %)	Taillis non exploité de fertilité haute dépérissant (-35 %)
Sc_FutRes_Exploit_MB_1 : Récolte des menus bois en futaie résineuse avec une dégradation moyenne des menus bois	Futaie résineuse	Moyenne	BO+ BIBE+MB (100 %)	Le devenir du BO et du BIBE n'a pas d'influence sur les résultats étant donné qu'il est le même dans les deux cas. Dégradation moyenne des MB.
Sc_FutRes_Exploit_MB_2 : Récolte des menus bois en futaie résineuse avec une dégradation forte des menus bois avec une dégradation forte des menus bois	Futaie résineuse	Moyenne	BO+ BIBE+MB (100 %)	Le devenir du BO et du BIBE n'a pas d'influence sur les résultats étant donné qu'il est le même dans les deux cas. Dégradation forte des MB.
Sc_FutRes_Exploit_MB_3 : Récolte des menus bois en futaie résineuse avec une dégradation faible des menus bois	Futaie résineuse	Moyenne	BO+ BIBE+MB (100 %)	Le devenir du BO et du BIBE n'a pas d'influence sur les résultats étant donné qu'il est le même dans les deux cas. Dégradation faible des MB.
Sc_FutRes_Exploit_MB_4 : Récolte raisonnée des menus bois en futaie résineuse	Futaie résineuse	Moyenne	BO+ BIBE+MB (70 %)	Le devenir du BO et du BIBE n'a pas d'influence sur les résultats étant donné qu'il est le même dans les deux cas.
Sc_FutRes_Exploit_Houppier : Récolte des menus bois en futaie résineuse avec un scénario de référence de non récolte du houppier	Futaie résineuse	Moyenne	BO+ BE+MB (70 %)	Futaie exploitée en BO uniquement. Il est considéré que le houppier se dégrade comme le bois mort (et non pas comme des résidus)
Sc_FutRes_Exploit_Souch_1 : Récolte des souches en futaie résineuse avec une dégradation moyenne des souches	Futaie résineuse	Moyenne	BO+ BIBE+ 50 % souches	Le devenir du BO et du BIBE n'a pas d'influence sur les résultats étant donné qu'il est le même dans les deux cas. Dégradation moyenne des souches.
Sc_FutRes_Exploit_Souche_2 : Récolte des souches en futaie résineuse avec une dégradation forte des souches	Futaie résineuse	Moyenne	BO+ BIBE+ 50 % souches	Le devenir du BO et du BIBE n'a pas d'influence sur les résultats étant donné qu'il est le même dans les deux cas.. Dégradation forte des souches.

Nom du scénario	Nouveau scénario			Scénario de référence
	Itinéraire	*Classe de fertilité*	*Produits récoltés*	
Sc_FutRes_Exploit_Souche_3: Récolte des souches en futaie résineuse avec une dégradation faible des souches	Futaie résineuse	Moyenne	BO+ BIBE+ 50 % souches	Le devenir du BO et du BIBE n'a pas d'influence sur les résultats étant donné qu'il est le même dans les deux cas. Dégradation faible des souches.
Sc_FutFeuil_MB_1 : Récolte des menus bois en futaie feuillue avec une dégradation moyenne des menus bois	Futaie feuillue	Haute	BO+ BIBE+ MB (100 %)	Le devenir du BO et du BIBE n'a pas d'influence sur les résultats étant donné qu'il est le même dans les deux cas. Dégradation moyenne des menus bois.
Sc_FutFeuil_MB_2: Récolte des menus bois en futaie feuillue avec une dégradation forte des menus bois	Futaie feuillue	Haute	BO+ BIBE+ MB (100 %)	Le devenir du BO et du BIBE n'a pas d'influence sur les résultats étant donné qu'il est le même dans les deux cas. Dégradation forte des menus bois.
Sc_FutFeuil_MB_3: Récolte des menus bois en futaie feuillue avec une dégradation faible des menus bois	Futaie feuillue	Haute	BO+ BIBE+ MB (100 %)	Le devenir du BO et du BIBE n'a pas d'influence sur les résultats étant donné qu'il est le même dans les deux cas. Dégradation faible des menus bois.
Sc_Déprise_TCR_Label : Transformation d'une déprise agricole en TCR	TCR	Haute	BE+ MB (100 %)	Déprise agricole évoluant selon le scénario de référence du Label bas-carbone
Sc_Déprise_TCR_Bouleau : Transformation d'une déprise agricole en TCR	TCR	Haute	BE+ MB (100 %)	Déprise agricole évoluant vers un taillis de bouleau
Sc_Déprise_FutRes_Label : Transformation d'une déprise agricole en futaie de résineux	Futaie résineuse	Moyenne	BO+ BIBE+ MB (70 %)	Déprise agricole évoluant selon le scénario de référence du Label bas-carbone
Sc_Déprise_FutFeuil_Label : Transformation d'une déprise agricole en futaie feuillue	Futaie feuillue	Haute	BO+ BIBE+ MB (70 %)	Déprise agricole évoluant selon le scénario de référence du Label bas-carbone

18. Annexe 18 : Représentativité des scénarios

Représentativité par rapport à la récolte actuelle :

Dans le cadre du projet Gerboise (G. Landmann et al., 2019), une enquête a été menée par FCBA auprès des professionnels mobilisateurs de bois énergie en France sur les bois récoltés en 2015. Sur les 1,5 millions de tonnes de bois énergie couvertes par l'enquête, 71 % sont issues de feuillus (soit nettement plus que la proportion de feuillus récoltés tous usages confondus), 27 % de résineux auxquels s'ajoutent 2 % d'indéterminées. Parmi la récolte du bois énergie issu de feuillu, 61 % (43 %/71 %) de la récolte provient de coupe de taillis ou de taillis sous futaie.

- Les scénarios de récolte en taillis sont donc représentatifs à la nuance près que la récolte se fait majoritairement arbre entier (51 % de la récolte actuelle de bois énergie lorsque l'on évalue la part des différents modes de récolte) entièrement pour l'énergie alors que ce n'est pas ce qui est considéré dans les scénarios étudiés : une partie est allouée à la fabrication de piquet. De plus, il est fait l'hypothèse que 30 % des menus bois sont laissés sur coupe afin de considérer des scénarios qui respectent les recommandations de l'ADEME.
- Les scénarios de récolte spécifiques aux menus bois en futaie résineuse et feuillue font l'hypothèse d'une récolte de 70 % à 100 % des menus bois. Cependant, pour ces scénarios il est fait l'hypothèse que les houppiers seront séparés en menus bois (<7 cm) et BIBE (partie du houppier >7 cm) ce qui n'est pas effectif actuellement (l'exploitation des menus bois seuls n'est pas rentable). Le choix d'un scénario où la découpe est faite et le BIBE utilisé de la même façon dans le scénario de projet et le scénario de référence permet d'évaluer de manière isolée l'action de ramasser les menus bois,
- Le scénario de récolte de houppier en futaie résineuse est très représentatif (32 % de la récolte actuelle de bois énergie lorsque l'on évalue la part des différents modes de récolte). Aujourd'hui, le BIBE du houppier résineux est récolté soit pour le matériau soit pour l'énergie. Un scénario de référence utilisation matière (afin d'analyser le bilan de l'utilisation énergétique versus utilisation matière) reste en dehors du périmètre de l'étude.
- Le scénario de récolte des souches est peu représentatif de la récolte actuelle (2 % de la récolte actuelle).

Représentativité par rapport à la ressource sur pied :

Les feuillus représentent 65 % du volume de ressource sur pied. Le chêne sessile et pédonculé est l'essence la plus abondante parmi la ressource feuillue (41 % du volume total des feuillu). Les volumes de châtaignier représentent 6 % du volume total de ressource (Colin, 2018) mais 36 % du volume de taillis (IGN, campagne 2006-2010). Le chêne correspond à 34 % de la surface totale de de forêt feuillue en France et le châtaignier 6 % (Colin, 2018).

Les résineux représentent 35 % de la ressource sur pied et les futaies de douglas (en mélange ou non avec de l'épicéa, du sapin et du mélèze) représentent 21 % de ce volume (Colin, 2018) et 15 % de la surface de forêt résineuse. Le douglas est la deuxième essence de plantation en France derrière le pin maritime (20 % des surfaces de plantation (IGN, 2017)).

Les surfaces plantées en TCR sont très petites en France (quelques milliers d'hectares).

Représentativité par rapport à la ressource supplémentaire disponible à 2035 :

Les feuillus représente 97 % de la ressource BIBE supplémentaire à 2035 en considérant le scénario tendanciel de l'étude (ADEME et al., 2016) et 92 % dans le scénario de dynamique forestière. Le chêne et le châtaignier représentent respectivement 30 % et 6 % de la ressource supplémentaire disponible en BIBE feuillu en 2035 selon le scénario tendanciel (respectivement 33 % et 5,6 % pour le scénario de dynamique forestière). Ainsi 64 % du BIBE supplémentaire feuillus correspond à autres essences hors châtaignier et chêne (ex : hêtre, frêne, charme, peuplier, …). Le douglas représente 17 % de la ressource supplémentaire selon le scénario de dynamique forestière en BIBE résineux, celle-ci étant très faible pour ce scénario et négligeable pour le scénario tendanciel.

La récolte de menus bois représente 14 % de la récolte totale (BO, BIBE, MB) supplémentaire pour le scénario tendanciel de l'étude (ADEME et al., 2016) et 18 % de la récolte du scénario de dynamique forestière. Concernant la récolte des menus bois issus de feuillus, le chêne représente 20 % du potentiel et le châtaignier 9 % pour les deux scénarios.

L'étude a été mise à jour mais uniquement en ce qui concerne le bois d'œuvre : Réévaluation de la ressource et de la disponibilité en bois d'œuvre des essences feuillues et conifères en France, 2019, France Bois Forêt et Ministère de l'Agriculture.

La principale conclusion est que la ressource en bois d'œuvre de feuillue est en réalité moins importante de 30 % par rapport à celle calculée dans l'étude (ADEME et al., 2016). Cette baisse entraine certainement une disponibilité associée moins importante en BIBE et menus bois.

Représentativité des stocks de carbone par rapport aux modèles utilisés :

Les stocks de carbone (biomasse aérienne et souterraine) ainsi que les accroissements (en bois fort tige) observés dans les modèles utilisés dans l'étude sont présentés ci-dessous. La matière organique morte n'a pas été comptabilisée pour rendre les chiffres homogènes avec les données de stocks moyens de l'IGN.

Tableau 194 : Stocks de carbone (biomasse aérienne et souterraine) et accroissements (en bois fort tige) observés dans les modèles utilisés dans l'étude

	Stock de carbone moyen (tC/ha)	Volume bois fort tige sur pied moyen (m^3/ha)	Stock de carbone maximum (tC/ha) max	Accroissement moyen bois fort tige (en m^3/ha/an)
modèle de futaie de douglas - fertilité moyenne à haute	78	255	180	18,3
modèle de futaie de douglas - fertilité basse à moyenne	63	201	127	12,3
modèle de taillis de châtaignier - fertilité haute	45	108	74	9,9
modèle de taillis de châtaignier - fertilité moyenne	45	110	72	5,5
modèle de futaie de châtaigner - fertilité haute	59	140	115	9
modèle de futaie de chêne - fertilité haute	166	411	315	8,34
modèle de taillis de référence - fertilité haute - (taillis en croissance - t0=20 ans)				
croissant puis dépérissant (-35 %)	84	218	118	
modèle de taillis de référence - fertilité basse - (taillis en croissance - t0 =35 ans)				
croissant puis dépérissant (-35 %)	86	229	111	
modèle de taillis de référence - fertilité haute - (taillis capitalisés - t0=53 ans)				
à l'équilibre	118	300	118	
dépérissant (-35 %)	81	207	118	
très dépérissant (-50 %)	63	98	118	

Les différents modèles de croissance utilisés sont détaillés en Annexe 13. Les stocks moyens de carbone (biomasse aérienne et racinaire) et la production[160] par hectare fournis par l'IGN sont décrits dans le tableau suivant :

[160] Il s'agit de la production biologique réalisée au cours des 5 dernières années précédant l'année de l'inventaire. Elle est mesurée par carottage des arbres vivants sur pied. (Colin, 2018)

Tableau 195 : Stocks moyen et production à l'hectare pour les essences étudiées (Colin, 2018)

	Surface (ha)	Surface (en %)	Volume bois fort tige (mm³)	Volume bois fort tige (m³/ha)	Stock moyen de carbone tC/ha – selon GRECO	Stock moyen de carbone tC/ha (> 35 m² de surface terrière) - selon GRECO	Production moyenne (en m³/an/ha)	Production (>35 m² de surface terrière) - selon GRECO
Châtaignier	617 000	6%	103 867	168	72-100	148 - 177	6,6	8,5 - 12,1
Chêne pédonculé et sessile	3 719 300	34%	699 867	188	75-126	161 - 192	4,9	7,1 - 8,7
Feuillus (autre)	6 488 800	60%	913 000	140	34-130	58 - 247	4,3	1,6 - 13,8
Total feuillus	**10 825 100**	100%	1717000					
Epicéa/Sapin/Douglas/Mélèze	653 800	15%	197 985	302	83-107	140 - 181	12,0	5,4 - 22,0
Pins	1 838 400	43%	247 574	134	39-105	103 - 153	5,4	4,9 - 13,7
Résineux (autre)	1 755 800	42%	489 909	279	41-124	101 - 222	5,6	6,2 - 11,6
Total Résineux	**4 248 000**	100%	935 469					

La production selon l'IGN correspond à l'accroissement plus le recrutement de jeunes arbres. L'accroissement calculé pour les modèles de croissance peut être assimilé et donc comparé à la production présentée dans les données IGN puisqu'il n'y a pas de recrutement dans les modèles.

Conclusion :

On peut observer que les essences sélectionnées sont représentatives de la forêt française en termes de surfaces plantées et de volumes supplémentaires disponibles pour l'énergie.

Concernant les modèles, on peut constater que les productions moyennes observées dans les modèles sont supérieures aux productions moyennes observées par l'IGN mais restent inférieures aux maximum de productions IGN (parcelle de surface terrière > 35 m²). Les stocks moyens calculés à la parcelle pour les modèles sont par contre inférieurs pour le douglas et pour le châtaignier mais supérieurs pour le chêne.

19. Annexe 19 : Détail des calculs

Une courbe d'évolution des stocks en forêt $C_{Forêt\ Scénario}$ (t) a été tracée ainsi qu'une courbe équivalente pour le scénario contrefactuel $C_{Forêt\ Contrefactuel}$ (t). Les deux scénarios divergent à partir de t0 qui est le moment où la décision de récolter plus de bois énergie est prise ou de modifier le mode de gestion sylvicole. On peut noter que le choix de t0 est important particulièrement pour les calculs réalisés à un horizon court terme. En effet, selon que l'on démarre le calcul du stock moyen juste après une coupe ou au moment de la plantation, les résultats sont différents. Des courbes d'évolution des stocks dans les produits sont également calculées pour les deux scénarios, $C_{Produit\ Scénario}$(t) et $C_{Produit\ Contrefactuel}$(t).

Les stocks moyens sont ensuite calculés pour les deux scénarios et pour différents horizons de temps à partir de t0: 30 ans, 100 ans et un temps infini (ou égal à une révolution si l'itinéraire est reproduit à l'infini) : $C_{Forêt\ Moyen\ sur\ 30\ ans\ Scénario}$, $C_{Forêt\ Moyen\ sur\ 100\ ans\ Scénario}$ et $C_{Forêt\ Moyen\ sur\ infini\ Scénario}$ pour le scénario étudié et $C_{Forêt\ Moyen\ sur\ 30\ ans\ Contrefactuel}$, $C_{Forêt\ Moyen\ sur\ 100\ ans\ Contrefactuel}$ et $C_{Forêt\ Moyen\ sur\ infini\ Contrefactuel}$ pour le scénario contrefactuel. Les stocks moyens pour les produits sont calculés pour les mêmes horizons de temps.

Ces grandeurs sont illustrées pour un scénario de transformation de taillis en futaie de résineux dans le Tableau 196. Les trois figures de gauche suivantes présentent les courbes des stocks de carbone en forêt $C_{Forêt\ Scénario}$ (t) et $C_{Forêt\ Contrefactuel}$ (t) en fonction du temps en illustrant le calcul du stock moyen aux trois horizons de temps étudiés. Les trois courbes de droite présentent les mêmes grandeurs pour les stocks de carbone dans les produits sachant qu'il n'y a pas de récolte dans le scénario contrefactuel et que le stock dans les produits est nul par conséquent.

Le calcul de l'impact pour les trois horizons se fait en divisant le différentiel de stock par la récolte à l'horizon correspondant pour les horizons 30 ans et 100 ans et par la récolte d'une révolution pour l'horizon de temps infini. Ce dernier calcul correspond à l'attribution de la modification du stock moyen des deux itinéraires sylvicoles à la première révolution. Il n'y aurait donc aucun impact à attribuer à la seconde révolution du scénario étudié. Un stock supérieur du scénario contrefactuel par rapport au scénario étudié correspond à une émission associée au scénario projet et un stock supérieur du scénario étudié par rapport au scénario contrefactuel correspond à une émission négative/ captation : d'où le différentiel égal au stock moyen contrefactuel moins le stock moyen du scénario projet.

Une fois que le ratio en tC/tC est obtenu, les calculs pour obtenir les résultats en tCO_2/m^3 et tCO_2/MWh sont obtenus comme suit :

Flux en tCO_2/m^3 = Flux en tC/tC*44/12*0,5 (contenu carbone du bois anhydre) / Infradensité de l'essence en kg/m^3

Flux tCO_2/MWh = 437 $kgCO_2$ par MWh * Ratio tC/tC

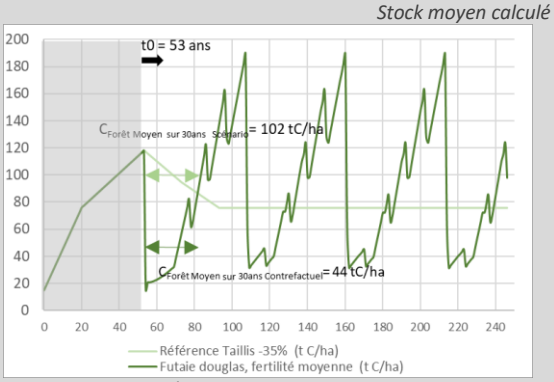
Les infradensités sont données en annexe 13.1.

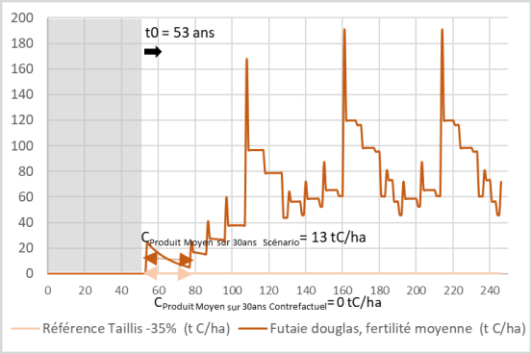
On considère une chaudière de rendement 85 %, un taux d'humidité de 25 % et un PCI de 13,2 MJ/kg soit une émission de 437 $kgCO_2$ par MWh d'énergie utile

Tableau 196 : Détail du calcul des émissions et captations

Forêt | Produit

Stock moyen calculé à l'horizon 30 ans après t0



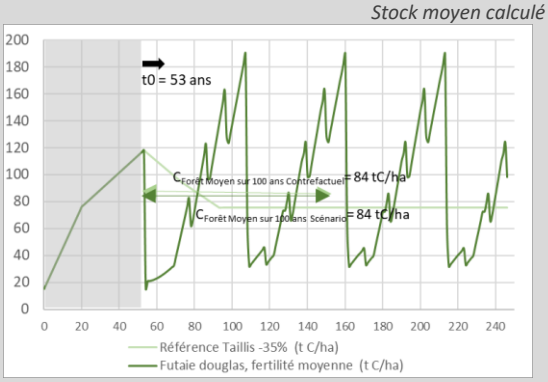


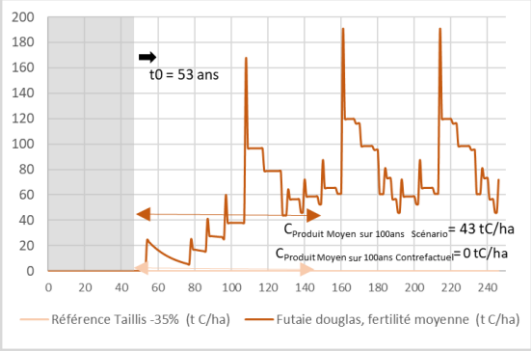
Récolte $_{30\ ans}$ = 123 tC/ha

Impact $_{Forêt\ 30\ ans}$ = $C_{Forêt\ Moyen\ sur\ 30\ ans\ Contrefactuel}$ - $C_{Forêt\ Moyen\ sur\ 30\ ans\ Scénario}$ / Récolte $_{30\ ans}$ = (102 – 44)/123 = +0,49 tC/tC

Impact $_{Produit\ 30\ ans}$ = $C_{Produit\ Moyen\ sur\ 30\ ans\ Contrefactuel}$ – $C_{Produit\ Moyen\ sur\ 30\ ans\ Scénario}$ / Récolte $_{30\ ans}$ = (0 – 13)/123 = -0,10 tC/tC

Stock moyen calculé à l'horizon 100 ans après t0



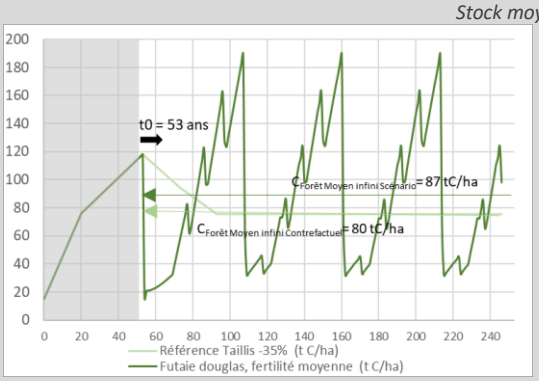


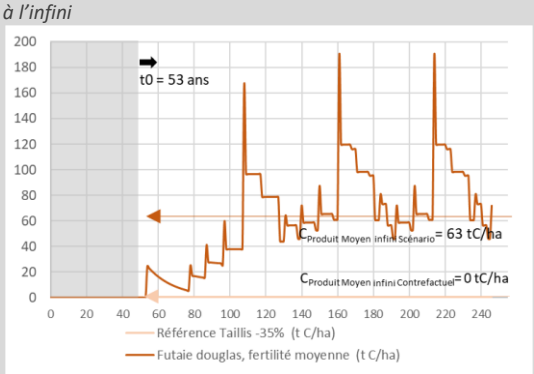
Récolte $_{100\ ans}$ = 392 tC/ha

Impact $_{Forêt\ 100\ ans}$ = $C_{Forêt\ Moyen\ sur\ 100\ ans\ Contrefactuel}$ - $C_{Forêt\ Moyen\ sur\ 100\ ans\ Scénario}$ / Récolte $_{100\ ans}$ = (84 – 84)/392 = +0,0033 tC/tC

Impact $_{Produit\ 100\ ans}$ = $C_{Produit\ Moyen\ sur\ 100\ ans\ Contrefactuel}$ – $C_{Produit\ Moyen\ sur\ 100\ ans\ Scénario}$ / Récolte $_{100\ ans}$ = (0 – 43)/392 = -0,11 tC/tC

Stock moyen calculé à l'infini





Récolte $_{1\ révolution}$ = 184 tC/ha

Impact $_{Forêt\ 100\ ans}$ = $C_{Forêt\ Moyen\ infini\ Contrefactuel}$ - $C_{Forêt\ Moyen\ infini\ Scénario}$ / Récolte $_{1\ révolution}$ = (80 – 87)/184 = -0,037 tC/tC

Impact $_{Produit\ 100\ ans}$ = $C_{Produit\ Moyen\ infini\ Contrefactuel}$ – $C_{Produit\ Moyen\ infini\ Scénario}$ / Récolte $_{100\ ans}$ = (0 – 63)/184 = -0,34 tC/tC

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

Table des tableaux

Tableau 1 : Questionnements principaux de l'étude 14
Tableau 2 : Liens entre objectifs et questionnements principaux de l'étude et mention de la partie du rapport dans laquelle ces questionnements trouveront une réponse 15
Tableau 3 : Intégration des deux lots - Périmètre de l'analyse du cycle de vie des filières bois énergie dans les différentes parties du présent rapport 15
Tableau 4 : Termes utilisés dans la partie 1 16
Tableau 5 : Synthèse des itinéraires de préparation possibles pour les combustibles 19
Tableau 6 : Synthèse des chaufferies biomasse 20
Tableau 7 : Scénarios retenus en cas de base – Partie 1 22
Tableau 8 : Raison principale de la non-sélection des combustibles étudiés 22
Tableau 9 : Lien entre les questionnements principaux de l'étude et les scénarios 23
Tableau 10 : Questionnements associés aux variantes – Variabilité des systèmes rencontrés 24
Tableau 11 : Questionnements associés aux variantes – Variabilité des choix méthodologiques – Partie 1 25
Tableau 12 : Description des étapes du cycle de vie étudiées – Bois forestier 30
Tableau 13 : Description des étapes du cycle de vie étudiées – Connexes (écorces ou chutes issues de scierie ou papeterie) utilisés directement sur site 31
Tableau 14 : Description des étapes du cycle de vie étudiées – Granulés issus de connexes de scierie (production géographiquement intégrée) 32
Tableau 15 : Description des étapes du cycle de vie étudiées – Bois déchets « propre » et « adjuvanté » 33
Tableau 16 : Indicateurs d'impacts potentiels (EF 2.0) 35
Tableau 17 : Facteurs de caractérisation utilisés pour le modèle de caractérisation des impacts sur le changement climatique (source : PEF 2.0) – Liste non exhaustive 36
Tableau 18 : Résolution de la multifonctionnalité – Partie 1 39
Tableau 19 : Etapes de gestion sylvicoles considérées 42
Tableau 20 : Caractéristiques des combustibles 43
Tableau 21 : Etapes prises en compte pour la préparation des combustibles 44
Tableau 22 : Données et hypothèses relatives au broyage en bord de route 44
Tableau 23 : Données et hypothèses relatives au transport du combustible depuis le bord de route vers la plateforme de préparation des plaquettes 45
Tableau 24 : Données et hypothèses relatives au séchage naturel 45
Tableau 25 : Données et hypothèses relatives au concassage (broyage lent) 46
Tableau 26 : Données et hypothèses relatives au broyage rapide 46
Tableau 27 : Données et hypothèses relatives au criblage (crible mobile à moteur thermique) 47
Tableau 28 : Données et hypothèses relatives à la préparation des granulés – unité de production géographiquement intégrée à la scierie 48
Tableau 29 : Données et hypothèses relatives au transport vers la chaufferie 49
Tableau 30 : Spécificités en termes de types de combustibles et types de chaufferie prises en compte dans la modélisation de la combustion en chaufferie 49
Tableau 31 : Combustion en chaufferie – Émissions atmosphériques sur base des valeurs limites d'émissions (VLE) (source : ICPE) – Méthode 1 50
Tableau 32 : Combustion en chaufferie – Émissions (avant traitement éventuel des fumées) – Méthode 2 51
Tableau 33 : Comparaison des méthodes pour déterminer les émissions atmosphériques 51
Tableau 34 : Émissions utilisées dans la modélisation pour la combustion en chaufferie (avant traitement éventuel des fumées) 51
Tableau 35 : Fonctionnement de la chaufferie (source : Collecte auprès de différents professionnels du secteur et expertise de Biomasse Normandie) 53
Tableau 36 : Consommables pour le fonctionnement de la chaufferie 54
Tableau 37 : Quantité de cendres 54
Tableau 38 : Composition des cendres sous foyer et multi-cycloniques en mélange 55
Tableau 39 : Biodisponibilité des éléments dans les cendres 56
Tableau 40 : Données et hypothèses relatives au séchage forcé 57
Tableau 41 : Données et hypothèses relatives au broyage sur plateforme de rondins et au séchage naturel qui s'en suit 58
Tableau 42 : Présence d'un système de traitement des fumées « SNCR » urée/ammoniac 59
Tableau 43 : Émissions atmosphériques supérieures à la réglementation (exercice théorique) 60
Tableau 44 : Émissions atmosphériques de la chaufferie suivant la nouvelle réglementation (exercice théorique) 60
Tableau 45 : Mise en place d'une unité de condensation 62
Tableau 46 : Distance de transport accrue parcourue pour approvisionner la chaufferie en combustible 62
Tableau 47 : Différences prises en compte dans l'étude suivant l'origine de la biomasse et le type de produits récoltés – Gestion de la multifonctionnalité 63

Tableau 48 : Différences prises en compte dans l'étude suivant l'origine de la biomasse et le type de produits récoltés – Étapes considérées dans la gestion sylvicoles et types de gestion réalisée 64
Tableau 49 : Différences prises en compte dans l'étude suivant l'origine de la biomasse et le type de produits récoltés – Données relatives au transport à partir de la forêt et aux propriétés du combustible issu de la biomasse forestière étudiée 65
Tableau 50 : Émissions atmosphériques d'une chaufferie d'une puissance ≥ 50 MW pour valoriser les connexes de scierie ou papeterie 66
Tableau 51 : Données relatives à l'approvisionnement des granulés hors France 66
Tableau 52 : Données et hypothèses relatives à la préparation des granulés – unité de production géographiquement intégrée à la scierie – Variante « gaz naturel » 67
Tableau 53 : Données et hypothèses relatives à la préparation des granulés – unité de production géographiquement intégrée à la scierie – Variante cogénération 67
Tableau 54 : Différences prises en compte dans l'étude suivant l'origine de la biomasse et le type de produits récoltés – Variante dans la gestion de la multifonctionnalité 68
Tableau 55 : Description des étapes du cycle de vie étudiées – Granulés issus de connexes de scierie (production géographiquement intégrée) – Variantes 69
Tableau 56 : Données et hypothèses relatives à la prise en compte des étapes amont à la préparation des granulés 70
Tableau 57 : Rappel des principales caractéristiques du scénario 1 74
Tableau 58 : Contribution du scénario 1 aux enjeux environnementaux pertinents pour la filière bois énergie 74
Tableau 59 : Étapes contributrices aux enjeux environnementaux pour le scénario 1 75
Tableau 60 : Rappel des principales caractéristiques du scénario 2 76
Tableau 61 : Contribution du scénario 2 aux enjeux environnementaux pertinents pour la filière bois énergie 76
Tableau 62 : Étapes contributrices aux enjeux environnementaux pour le scénario 2 77
Tableau 63 : Rappel des principales caractéristiques du scénario 3 78
Tableau 64 : Contribution du scénario 3 aux enjeux environnementaux pertinents pour la filière bois énergie 78
Tableau 65 : Étapes contributrices aux enjeux environnementaux pour le scénario 3 79
Tableau 66 : Rappel des principales caractéristiques du scénario 4 80
Tableau 67 : Contribution du scénario 4 aux enjeux environnementaux pertinents pour la filière bois énergie 80
Tableau 68 : Étapes contributrices aux enjeux environnementaux pour le scénario 4 81
Tableau 69 : Rappel des principales caractéristiques du scénario 5 82
Tableau 70 : Contribution du scénario 5 aux enjeux environnementaux pertinents pour la filière bois énergie 82
Tableau 71 : Étapes contributrices aux enjeux environnementaux pour le scénario 5 83
Tableau 72 : Rappel des principales caractéristiques du scénario 6 83
Tableau 73 : Contribution du scénario 6 aux enjeux environnementaux pertinents pour la filière bois énergie 84
Tableau 74 : Étapes contributrices aux enjeux environnementaux pour le scénario 6 85
Tableau 75: Influence de l'origine de la biomasse forestière pour la production des plaquettes forestières – Focus étape de gestion sylvicole uniquement - Hiérarchie 86
Tableau 76: Influence de l'origine de la biomasse forestière pour la production des plaquettes forestières – Focus étape de gestion sylvicole uniquement – Valeurs absolues 86
Tableau 77: Gamme de contribution (en %) des différentes sous-étapes inclus dans l'étape de gestion sylvicole aux différents enjeux environnementaux 87
Tableau 78 : Influence de la provenance des plaquettes forestières par rapport au scénario S2 utilisé en cas de base 89
Tableau 79 : Influence de la provenance des granulés blancs par rapport au scénario S6 utilisé en cas de base 90
Tableau 80 : Influence du type de préparation des plaquettes forestières par rapport au scénario S1 utilisé en cas de base 92
Tableau 81 : Influence du respect de la réglementation par rapport au scénario S2 utilisé en cas de base 94
Tableau 82 : Influence de la mise en place d'une unité de condensation par rapport au scénario S2 utilisé en cas de base 95
Tableau 83 : Influence de l'utilisation de sources ou de principes différents pour le séchage des granulés par rapport au scénario S6 utilisé en cas de base 97
Tableau 84: Influence de l'affectation entre deux produits issus de l'exploitation forestière - Focus étape de gestion sylvicole uniquement - Hiérarchie 98
Tableau 85: Influence de l'affectation entre deux produits issus de l'exploitation forestière - Focus étape de gestion sylvicole uniquement – Valeurs absolues 98
Tableau 86 : Influence de l'affectation d'une partie des impacts de l'amont forestier aux granulés par rapport au scénario S6 utilisé en cas de base 99
Tableau 87 : Analyse comparative entre différents modes de production de chaleur 100
Tableau 88 : Influence du mode d'affectation utilisé pour résoudre la multifonctionnalité lors d'une production conjointe de chaleur et d'électricité (élargissement des frontières du système vs. contenu énergétique) – Valeurs absolues 100
Tableau 89 : Flux élémentaires contributeurs et origines pour les différents enjeux environnementaux liés à la pollution de l'air 110
Tableau 90 : Origines des contribution pour différents enjeux environnementaux et origines pour les différents enjeux environnementaux liés à l'utilisation des ressources. 111
Tableau 91 : Description des étapes du cycle de vie étudiées – Énergie fossile 116

Tableau 92 : Répartition des importations en France en 2018 [source : Chiffres clés de l'énergie – Édition 2019 – MTES – CGDD - SDES] 118
Tableau 93 : Scénario mix gaz naturel France 2030 retenu comme variante dans cette étude 119
Tableau 94 : Pourcentage de fuites de méthane par pays producteur – Cas de base 120
Tableau 95 : Pourcentage de fuites de méthane (total amont + aval hors distribution) étudiés en variante (IEA Methane tracker 2020) 121
Tableau 96 : Inventaires du cycle de vie utilisés pour la production du gaz naturel (amont) 122
Tableau 97 : Inventaires du cycle de vie utilisés pour le transport international du gaz naturel (aval) 123
Tableau 98 : Consommation énergétique pour le transport du gaz via pipeline 123
Tableau 99 : Inventaires du cycle de vie pour la liquéfaction du gaz naturel 124
Tableau 100 : Inventaires de cycle de vie retenus pour la distribution du gaz naturel en France 124
Tableau 101 : Combustion en chaufferie – Émissions atmosphériques sur base des valeurs limites d'émissions (VLE) (source : ICPE) 125
Tableau 102 : Émissions liées à la combustion pour la génération de 1 GJ d'énergie par une chaudière 125
Tableau 103 : Fonctionnement de la chaufferie 126
Tableau 104 : Comparaison des contributions des filières gaz naturel et bois énergie à différents indicateurs environnementaux 133
Tableau 105 : Résultats pour l'exploitation des taillis en croissance 153
Tableau 106 : Résultats pour l'amélioration des taillis 155
Tableau 107 : Résultats pour la transformation des taillis 163
Tableau 108 : Résultats pour la récolte des menus bois et du houppier 171
Tableau 109 : Résultats pour la récolte des souches 174
Tableau 110 : Résultats pour la récolte des plantations sur déprise agricole 181
Tableau 111 : Présentation de la combinaison des scénarios partie 3 et variante partie 1 utilisée 188
Tableau 112 : Bilans GES biogénique et fossile de la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles, permettant une augmentation de la récolte du bois énergie 190
Tableau 113 : Bilan GES total (biogénique + fossile) de la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles, permettant une augmentation de la récolte du bois énergie. 194
Tableau 114 : Composition chimique du bois (source : Biomasse Normandie) 213
Tableau 115 : PCI du combustible (source : Biomasse Normandie) 213
Tableau 116 : Mix électriques considérés dans l'étude 216
Tableau 117 : Critères pour l'évaluation de la qualité des données 221
Tableau 118 : Grille de notation globale des jeux de données d'inventaire (RDC sur base du PEF) 222
Tableau 119: Niveau global de qualité des données en fonction des cotes attribuées 222
Tableau 120 : Notation utilisée pour le niveau de robustesse des méthodes de caractérisation 223
Tableau 121 : Évaluation de la qualité des méthodes de caractérisation 223
Tableau 122 : Note associée à chaque niveau de robustesse 223
Tableau 123 : Calcul du facteur final de pondération pour chaque catégorie d'impact 224
Tableau 124 : Modèles de répartition statistique 225
Tableau 125 : Facteur d'incertitude associé à la note relative à la qualité des données 225
Tableau 126 : Distribution associée aux facteurs d'incertitude 226
Tableau 127 : Graphe de type « Boite à moustache » - Résultat moyen et incertitude sur le résultat moyen 227
Tableau 128 : Qualité des jeux de données d'inventaire utilisées dans la partie 1 227
Tableau 129 : Qualité des jeux de données d'inventaire utilisées dans la partie 2 229
Tableau 130 : Résultats normalisés et pondérés pour les scénarios 1 à 6 en valeur absolue par enjeu environnemental (points PEF) 234
Tableau 131 : Résultats normalisés et pondérés pour les scénarios 1 à 6 en pourcentage de contribution de chaque enjeu à l'empreinte totale 235
Tableau 132 : Résultats normalisés et pondérés pour les scénarios 1 à 6 en valeur absolue par étape du cycle de vie (points PEF) 236
Tableau 133 : Scénario 1 - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th} 237
Tableau 134 : Scénario 2 - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th} 238
Tableau 135 : Scénario 3 - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th} 239
Tableau 136 : Scénario 4 - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th} 240
Tableau 137 : Scénario 5 - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th} 241
Tableau 138 : Scénario 6 - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th} 242
Tableau 139 : Scénario 7 et Scénario 8 - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th} 243

Tableau 140 : Scénario 9 et variante méthodologique du scénario 9 (résolution de la multifonctionalité par affectation selon le contenu énergétique plutôt que par élargissement des frontières du système) - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th} 244
Tableau 141 : Variantes du scénario 1 (passage d'un séchage naturel à un séchage forcé ; passage d'un broyage en bord de route à un broyage sur plateform industrielle) - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th} 245
Tableau 142 : Variantes du scénario 2 (augmentation de la distance de transport de 35 à 200 km ; augmentation de la distance de transport de 35 à 500 km) - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}..... 246
Tableau 143 : Variantes du scénario 2 (mise en place d'un SNCR avec 40, 55 ou 70 % d'abbatement) - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}..... 247
Tableau 144 : Variantes du scénario 2 (dépassement de la règlementation pour les 6 polluants étudiés via : une multiplication par 2 du facteur d'émission pour tous les polluants ; une multiplication par 5 du facteur d'émission pour tous les polluants sauf les NO_x ; une multiplication par 5 du facteur d'émission pour tous les polluants sauf le CO) - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th} ... 248
Tableau 145 : Variantes du scénario 2 (respect de la nouvelle règlementation en termes de polluants atmosphériques ; mise en place d'un condensateur)..... 249
Tableau 146 : Variante du scénario 3 (passage d'une chaufferie de puissance 5-50 MW à une chaufferie de puissance > 50 MW présentant de plus faibles émissions de poussières et de NO_x) - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}..... 250
Tableau 147 : Variantes du scénario 6 (passage d'un combustible écorce et broyat de palettes au combustible gaz naturel pour le séchage des granulés ; passage d'un séchage en chaufferie à un séchage en unité de cogénération) - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th}..... 251
Tableau 148 : Variantes du scénario 6 (passage de granulés français à des granulés américains ; allocation d'un impact aux connexes utilisés pour fabriquer les granulés) - Contribution des différentes étapes de la filière aux différents enjeux environnementaux par MWh_{th} 252
Tableau 149 : Contribution à l'utilisation des ressources fossiles et au changement climatique (en excluant le carbone biogénique) des différentes filières de production de la biomasse utilisée pour produire les plaquettes forestières..... 253
Tableau 150 : Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « acidification de l'air », « émissions de particules », « utilisation de terres » et « utilisation de ressources fossiles et nucléaires » et la production d'1 MWh_{th} 254
Tableau 151 : Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « changement climatique » et la production d'1 MWhPCI suivant deux modes de comptabilisation (bilan GES global avec comptabilité totale absorptions/émissions biogéniques et Neutralité carbone) 255
Tableau 152 : Résultats normalisés et pondérés pour les scénarios « gaz 2018 » et « gaz 2030 » en valeur absolue par enjeu environnemental et en répartition en %..... 256
Tableau 153 : Modèles de croissance utilisées pour les différentes essences étudiées 259
Tableau 154 : Caractéristiques des itinéraires sylvicoles envisagés dans les scénarios de récolte de bois énergie 260
Tableau 155 : Coefficients d'expansion, densité et contenu carbone sous CAPSIS 260
Tableau 156 : Stocks de carbone de la biomasse aérienne et souterraine pour les scénarios de référence en tC par hectare 261
Tableau 157 : Demi-vie de la matière organique morte..... 262
Tableau 158 : Devenir de la récolte des taillis de châtaigner 262
Tableau 159 : Devenir de la récolte des taillis de châtaigner variante matériau 263
Tableau 160 : Devenir de la récolte des différentes éclaircies et de la coupe finale pour la futaie de châtaignier263
Tableau 161 : Durée de vie des produits issus de la récolte des taillis et futaies de châtaignier..... 264
Tableau 162 : Durée de vie des produits issus de la récolte des futaies feuillues et résineuses..... 264
Tableau 163 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1 265
Tableau 164 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2 269
Tableau 165 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3 273
Tableau 166 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio..... 277
Tableau 167 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1 281
Tableau 168 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2 285
Tableau 169 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3 289
Tableau 170 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4 293
Tableau 171 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5 297

Tableau 172 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_1 301
Tableau 173 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_2 305
Tableau 174 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_3 309
Tableau 175 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_4 313
Tableau 176 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Houppier 318
Tableau 177 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1 323
Tableau 178 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2 327
Tableau 179 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3 331
Tableau 180 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_Souche_1 335
Tableau 181 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_Souche_2 340
Tableau 182 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_Souche_3 345
Tableau 183 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Déprise_TCR_Label 350
Tableau 184 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Déprise_TCR_Bouleau 355
Tableau 185 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Déprise_FutRes_Label 360
Tableau 186 : Détail de la récolte, des stocks en forêt et dans les produits, de l'accroissement pour le scénario projet et le scénario de référence - Sc_Déprise_FutFeuil_Label 365
Tableau 187 : Résultats pour l'ensemble des scénarios 369
Tableau 188 : Schéma des compartiments de l'arbre 371
Tableau 189 : Illustration des pertes de carbone du sol liés à une récolte des rémanents (d'après (Achat et al, 2015) 373
Tableau 190 : Scénarii étudiés dans RESOBIO 375
Tableau 191 : Impacts sur les stocks de matière organique (ou de carbone, en t/ha) et les concentrations en carbone (g/kg) en en fonction de l'horizon (couche de débris, litière, sol minéral de surface [0-20 cm], sol minéral profond [20-100 cm]). (Moyenne générale en noir, TTB en violet, TTBF en rouge, TTBR/TTBFR en bleu, TTBF+débris/litières en vert). 376
Tableau 192 : Evolution du stock de carbone dans le sol associé aux pratiques provoquant le stockage ou déstockage extrême (INRA, IGN, 2017) 377
Tableau 193 : Synthèse des scénarios étudiés et des scénarios de référence correspondant 383
Tableau 194 : Stocks de carbone (biomasse aérienne et souterraine) et accroissements (en bois fort tige) observés dans les modèles utilisés dans l'étude 386
Tableau 195 : Stocks moyen et production à l'hectare pour les essences étudiées (Colin, 2018) 387
Tableau 196 : Détail du calcul des émissions et captations 389

Table des figures

Figure 1 : Les différents devenirs possibles du bois forestier 17
Figure 2 : Cycle de vie des déchets de bois « propre » ou « adjuvanté » issus de produits en bois 18
Figure 3 : Illustration schématique des étapes du cycle de vie 26
Figure 4 : Illustration schématique d'un procédé unitaire caractérisé par des flux entrants et sortants (source : ADEME). 27
Figure 5 : Périmètre de l'étude pour le bois forestier (S1, S2, S7, S8, S9) 28
Figure 6 : Périmètre de l'étude pour les connexes et les granulés (S3 et S6)[35] 29
Figure 7 : Périmètre de l'étude pour les déchets bois (S4 et S5)[35] 29
Figure 8 : Cycle du carbone 36
Figure 9 : Principe de résolution d'une affectation par élargissement du système : cas d'une substitution (ADEME 2015) 38
Figure 10 : Principe de résolution d'une affectation par prorata : cas d'une affectation massique (ADEME 2015) 38
Figure 11 : Localisation dans l'arbre des principales classes et compartiments de bois : bois d'œuvre, bois d'industrie/bois énergie, et menus bois (adaptée de Colin 2009) 39
Figure 12 : Méthode utilisée pour la détermination des enjeux environnementaux pertinents 71
Figure 13 : Facteurs de pondération 71
Figure 14 : Répartition en pourcentage de l'empreinte environnementale entre les différents enjeux environnementaux 72
Figure 15 : Code couleur utilisé dans les illustrations 73
Figure 16 : Scénario 1 - Contribution (en %) des différentes étapes de la filière aux enjeux environnementaux pertinents 75
Figure 17 : Scénario 2 - Contribution (en %) des différentes étapes de la filière aux enjeux environnementaux pertinents 77
Figure 18 : Scénario 3 - Contribution (en %) des différentes étapes de la filière aux enjeux environnementaux pertinents 79
Figure 19 : Scénario 4 - Contribution (en %) des différentes étapes de la filière aux enjeux environnementaux pertinents 81
Figure 20 : Scénario 5 - Contribution (en %) des différentes étapes de la filière aux enjeux environnementaux pertinents 83
Figure 21 : Scénario 6 - Contribution (en %) des différentes étapes de la filière aux enjeux environnementaux pertinents 85
Figure 22 : Contribution au changement climatique des différentes filières de production de la biomasse utilisée pour produire les plaquettes forestières (kg CO_2 éq/MWh_{PCI}) (neutralité carbone des émissions CO_2 biogénique) 88
Figure 23 : Contribution à l'utilisation de ressources fossiles et nucléaires des différentes filières de production de la biomasse utilisée pour produire les plaquettes forestières (MJ éq/MWh_{PCI}) 88
Figure 24 : Influence de la provenance des plaquettes forestières par rapport au scénario S2 utilisé en cas de base 89
Figure 25 : Influence de la provenance des granulés blancs par rapport au scénario S6 utilisé en cas de base .. 90
Figure 26 : Influence du type de préparation des plaquettes forestières par rapport au scénario S1 utilisé en cas de base 92
Figure 27 : Influence de la mise en place d'un système de réduction des émissions d'oxydes d'azote de type SNCR 93
Figure 28 : Influence du respect de la réglementation 94
Figure 29 : Influence de la mise en place d'une unité de condensation par rapport au scénario S2 utilisé en cas de base 95
Figure 30 : Influence de l'augmentation de la puissance de la chaufferie par rapport au scénario S3 utilisé en cas de base 96
Figure 31 : Influence de l'utilisation de sources ou de principes différents pour le séchage des granulés par rapport au scénario S6 utilisé en cas de base 97
Figure 32 : Influence de l'affectation d'une partie des impacts de l'amont forestier aux granulés par rapport au scénario S6 utilisé en cas de base 99
Figure 33 : Influence du mode d'affectation utilisé pour résoudre la multifonctionnalité lors d'une production conjointe de chaleur et d'électricité (élargissement des frontières du système vs. contenu énergétique) 100
Figure 34 : Contribution des différentes filières bois énergie à l'empreinte environnementale totale (en points/MWh_{PCI}) – Répartition par étape du cycle de vie 101
Figure 35 : Contribution des différentes filières bois énergie à l'empreinte environnementale totale (en points/MWh_{PCI}) – Répartition par enjeu environnemental 102
Figure 36 : Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « émissions de poussières » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en incidences de maladie) 102
Figure 37 : Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « acidification de l'air » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en moles H+ éq.) 103
Figure 38 : Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « utilisation de ressources fossiles et nucléaires » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en MJ éq.) 104

Figure 39 : Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « utilisation de terres » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en points)..... 105
Figure 40 : Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « changement climatique » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en kg éq CO_2) – Bilan GES global avec comptabilité totale absorptions/émissions biogéniques. 105
Figure 41 : Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « changement climatique » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en kg éq CO_2) –Neutralité C 106
Figure 42 : Périmètre de l'étude pour les énergies fossiles (S10)[35]..... 115
Figure 43 : Provenance des importations de gaz naturel français (1973-2018) [source : Chiffres clés de l'énergie – Édition 2019 – MTES – CGDD - SDES] 117
Figure 44 : Réseau de gaz français [source : Chiffres clés de l'énergie – Édition 2019 – MTES – CGDD - SDES] 118
Figure 45 : Valeurs moyennes du taux de fuite (amont et aval hors distribution) en 2018 et valeur min-max de la littérature étudiées comme variante..... 122
Figure 46 : Méthode utilisée pour la détermination des enjeux environnementaux pertinents..... 127
Figure 47 : Facteurs de pondération..... 127
Figure 48 : Répartition en pourcentage de l'empreinte environnementale entre les différents enjeux environnementaux 128
Figure 49 : Analyse comparative des deux filières de production de chaleur pour l'enjeu « changement climatique » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en kg CO_2 éq)..... 128
Figure 50 : Analyse comparative des deux filières de production de chaleur pour l'enjeu « Utilisation des ressources fossiles et nucléaires » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en MJ éq) 130
Figure 51 : Analyse comparative des deux filières de production de chaleur pour l'enjeu « Émissions de particules » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en incidences de maladie)..... 131
Figure 52 : Analyse comparative des deux filières de production de chaleur pour l'enjeu « Utilisation des terres » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en point) 132
Figure 53 : Analyse comparative des deux filières de production de chaleur pour l'enjeu « Acidification de l'air » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en moles H+ éq.) 132
Figure 54 : Stocks de carbone en forêt présentés pour le scénario de référence en bleu, un scénario d'augmentation de la récolte pour l'énergie avec réduction du stock moyen en rouge, un scénario d'augmentation de la récolte pour l'énergie avec augmentation du stock moyen via une amélioration de la gestion sylvicole en vert, le scénario d'anticipation d'augmentation de la récolte en violet – Figure 1a : à l'échelle de la parcelle – Figure 1b : à l'échelle du massif dont les stocks sont à l'équilibre – Figure 1c : à l'échelle du massif dont les stocks augmentent (Cowie, Berndes, & Smith, 2013)..... 137
Figure 55 : Illustration schématique de la méthodologie pour la comptabilisation du carbone biogénique, pour l'horizon de temps à 30 ans sur un exemple de scénario analysé dans l'étude. 139
Figure 56 : Localisation dans l'arbre des principales classes et compartiments de bois : bois d'œuvre, bois d'industrie / bois énergie, et menus bois 142
Figure 57 : Les scénarios projet étudiés 144
Figure 58 : Scénarios de gestion des taillis en croissance..... 147
Figure 59 : Scénarios de transformation des taillis capitalisés 148
Figure 60 : Scénarios de référence pour les taillis en croissance de fertilité haute – stocks en forêt (tC/ha) 148
Figure 61 : Scénarios de référence pour les taillis en croissance de fertilité basse – stocks en forêt (tC/ha)..... 148
Figure 62 : Scénarios de référence pour les taillis capitalisés– stocks en forêt (tC/ha) 149
Figure 63 : Stocks en forêt, scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1 149
Figure 64 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1 150
Figure 65 : Stocks en forêt, scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2 150
Figure 66 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2 151
Figure 67 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3 152
Figure 68 : Résultats de l'indicateur ILCD pour les scénarios d'exploitation des taillis en croissance..... 152
Figure 69 : Stocks en forêt, scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio..... 154
Figure 70 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio..... 154
Figure 71 : Résultats de l'indicateur ILCD pour les scénarios d'amélioration des taillis..... 155
Figure 72 : Stocks en forêt, scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1 157
Figure 73 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1 157
Figure 74 : Stocks en forêt, scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2 158
Figure 75 : Stocks en forêt, scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3 159
Figure 76 : Stocks en forêt, scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4 160
Figure 77: Stocks dans les produits, scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4 160
Figure 78 : Stocks en forêt, scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5 161
Figure 79 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5 161
Figure 80: Résultats de l'indicateur ILCD pour les scénarios de transformation des taillis 162
Figure 81 : Scénarios d'augmentation de la récolte en bois énergie en récoltant les menus bois et les houppiers 164
Figure 82 : Scénarios d'augmentation de la récolte en bois énergie pour les souches 164
Figure 83 : Stocks en forêt, scénario Sc_FutRes_Exploit_MB_1..... 165

Figure 84 : Stocks dans la matière organique morte associée à la révolution, scénario Sc_FutRes_Exploit_MB_1 165
Figure 85 : Stocks dans la matière organique morte associée à la révolution, impact du taux de dégradation des MB, scénarios Sc_FutRes_Exploit_MB_2 et Sc_FutRes_Exploit_MB_3 166
Figure 86 : Stocks dans la matière organique morte associée à la révolution, impact du taux de récolte des MB, Sc_FutRes_Exploit_MB_1 et Sc_FutRes_Exploit_MB_4 167
Figure 87 : Stocks dans la matière organique morte associée à la révolution, Sc_FutRes_Exploit_MB_1 et Sc_FutRes_Exploit_Houppier 168
Figure 88 : Stocks en forêt, scénario Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1 168
Figure 89 : Stocks dans la matière organique morte associée à la révolution, scénario Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1 169
Figure 90 : Stocks dans la matière organique morte associée à la révolution, impact du taux de dégradation des MB, scénarios Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2 et Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3 170
Figure 91 : Résultats de l'indicateur ILCD pour les scénarios de récolte des MB et des houppiers 170
Figure 92 : Stocks en forêt, scénario Sc_FutRes_Exploit_Souche_1 172
Figure 93 : Stocks dans la matière organique morte associée à la révolution, scénario Sc_FutRes_Exploit_Souche_1 172
Figure 94 : Stocks dans la matière organique morte associée à la révolution, scénarios Sc_FutRes_Exploit_Souches_2 et Sc_FutRes_Exploit_Souches_3 173
Figure 95 : Résultats de l'indicateur ILCD pour les scénarios de récolte des souches 174
Figure 96 : Résultats de l'indicateur ILCD pour les scénarios de récolte des MB (100 %) et des souches avec une estimation de l'impact sur le carbone du sol 175
Figure 97 : Scénarios de reboisement des terres en déprise agricole 176
Figure 98 : Stocks en forêt, scénario Sc_Déprise_TCR_Label 177
Figure 99 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Déprise_TCR_Label 177
Figure 100 : Stocks en forêt, scénario Sc_Déprise_TCR_Bouleau 178
Figure 101 : Stocks en forêt, scénario Sc_Déprise_FutRes_Label 178
Figure 102 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Déprise_FutRes_Label 179
Figure 103 : Stocks en forêt, scénario Sc_Déprise_FutFeuil_Label 179
Figure 104 : Stocks dans les produits, scénario Sc_Déprise_FutFeuil_Label 180
Figure 105 : Résultats de l'indicateur ILCD pour les scénarios de boisement de terres en déprise agricole 180
Figure 106 : Contribution des GES d'origine biogénique au changement climatique pour la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières produites à partir de biomasse issue de différents types de gestion sylvicole – Cas-type 1 - Mise en gestion d'un taillis 185
Figure 107 : Contribution des GES d'origine biogénique au changement climatique pour la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières produites à partir de biomasse issue de différents types de gestion sylvicole – Cas-type 2 - Récolte accrue de produits annexes à la récolte du bois d'œuvre 186
Figure 108 : Contribution des GES d'origine biogénique au changement climatique pour la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières produites à partir de biomasse issue de différents types de gestion sylvicole – Cas-type 3 - Plantation sur déprise agricole 187
Figure 109 : Bilans GES biogénique (barre de couleur) et fossile (ligne noire) de la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles, permettant une augmentation de la récolte du bois énergie 191
Figure 110 : Bilan GES total (barre de couleur = biogénique + fossile) de la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles, permettant une augmentation de la récolte du bois énergie. 193
Figure 111 : Méthodologie ACV – Principe de classification 217
Figure 112 : Méthodologie ACV – Principe de caractérisation 217
Figure 113 : Méthodologie ACV – Principe de normalisation 218
Figure 114 : Méthodologie ACV – Principe de pondération 218
Figure 115 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « changement climatique » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en kg CO_2 éq) – Filière bioénergie 230
Figure 116 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Utilisation des ressources fossiles et nucléaires » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en MJ éq) – Filière bioénergie 230
Figure 117 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Émissions de particules » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en incidences de maladie) – Filière bioénergie 230
Figure 118 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Utilisation des terres » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en point) – Filière bioénergie 231
Figure 119 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Acidification de l'air » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en moles H+ éq.) – Filière bioénergie 231
Figure 120 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Eutrophisation terreste » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en moles N+ éq.) – Filière bioénergie 231
Figure 121 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « changement climatique » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en kg CO_2 éq) – Filière gaz 2018 232
Figure 122 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Utilisation des ressources fossiles et nucléaires » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimée en MJ éq) – Filière gaz 2018 232

Figure 123 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Émissions de particules » et la production d'1 MWhPCI (exprimé en incidences de maladie) – Filière gaz 2018 232
Figure 124 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Utilisation des terres » et la production d'1 MWhPCI (exprimé en point) – Filière gaz 2018..... 232
Figure 125 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Acidification de l'air » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en moles H+ éq.) – Filière gaz 2018..... 233
Figure 126 : Influence de l'incertitude sur les jeux de données utilisés pour l'enjeu « Eutrophisation terreste » et la production d'1 MWh_{PCI} (exprimé en moles N+ éq.) – Filière gaz 2018..... 233
Figure 127 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1 267
Figure 128 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1 268
Figure 129 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1 268
Figure 130 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2 271
Figure 131 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2 272
Figure 132 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2 272
Figure 133 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_3 275
Figure 134 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_1 275
Figure 135 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Exploit_2 276
Figure 136 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio..... 279
Figure 137 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio280
Figure 138 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_En_Croissance_Amélio 280
Figure 139 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1 283
Figure 140 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1.. 284
Figure 141 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_1 284
Figure 142 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2 287
Figure 143 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2.. 288
Figure 144 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_2 288
Figure 145 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3 291
Figure 146 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3.. 292
Figure 147 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_3 292
Figure 148 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4 295
Figure 149 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4.. 295
Figure 150 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_4 296
Figure 151 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5 299
Figure 152 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5.. 299
Figure 153 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Taillis_Capitalisé_Transfo_5 300
Figure 154 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutRes_Exploit_MB_1 303
Figure 155 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_1 303
Figure 156 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_1 304
Figure 157 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_1 304
Figure 158 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutRes_Exploit_MB_2 307
Figure 159 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_2 307
Figure 160 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_2 308

Figure 161 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_2 308
Figure 162 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutRes_Exploit_MB_3 311
Figure 163 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_3 311
Figure 164 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_3 312
Figure 165 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_3 312
Figure 166 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutRes_Exploit_MB_4 315
Figure 167 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_4 316
Figure 168 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_4 316
Figure 169 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_MB_4 317
Figure 170 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutRes_Exploit_Houppier 320
Figure 171 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Houppier 321
Figure 172 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Houppier 321
Figure 173 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Houppier322
Figure 174 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1 325
Figure 175 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1 325
Figure 176 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1 326
Figure 177 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_1 ... 326
Figure 178 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2 329
Figure 179 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2 329
Figure 180 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2 330
Figure 181 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_2 ... 330
Figure 182 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3 333
Figure 183 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3 333
Figure 184 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3 334
Figure 185 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutFeuil_Exploit_MB_3 ... 334
Figure 186 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutRes_Exploit_Souche_1 337
Figure 187 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_1 338
Figure 188 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_1 338
Figure 189 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_1 339
Figure 190 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutRes_Exploit_Souche_2 342
Figure 191 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_2 343
Figure 192 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_2 343
Figure 193 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_2 344
Figure 194 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_FutRes_Exploit_Souche_3 347
Figure 195 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_3 348
Figure 196 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_3 348
Figure 197 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_FutRes_Exploit_Souche_3 349
Figure 198 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Déprise_TCR_Label 352
Figure 199 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_Déprise_TCR_Label 353
Figure 200 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Déprise_TCR_Label 353
Figure 201 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Déprise_TCR_Label 354
Figure 202 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Déprise_TCR_Bouleau 357

Figure 203 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_Déprise_TCR_Bouleau 358
Figure 204 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Déprise_TCR_Bouleau 358
Figure 205 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Déprise_TCR_Bouleau ... 359
Figure 206 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Déprise_FutRes_Label 362
Figure 207 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_Déprise_FutRes_Label 362
Figure 208 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Déprise_FutRes_Label 363
Figure 209 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Déprise_FutRes_Label ... 364
Figure 210 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario projet - Sc_Déprise_FutFeuil_Label 367
Figure 211 : Stocks de carbone dans la biomasse aérienne, souterraine et dans la matière organique morte pour le scénario de référence - Sc_Déprise_FutFeuil_Label 367
Figure 212 : Stocks en forêt total, scénario projet et scénario de référence - Sc_Déprise_FutFeuil_Label 368
Figure 213 : Stocks dans les produits, scénario projet et scénario de référence - Sc_Déprise_FutFeuil_Label .. 368

SIGLES ET ACRONYMES

ACV	Analyse du Cycle de Vie
EF	Électrofiltre
FAM	Filtre à manches
FdV/EoL	Fin de Vie / End-of-Life
GES	Gaz à effet de serre
ICV	Inventaire du cycle de vie
JRC	Joint Research Center
MC	Multi-cyclone
MJ	Mégajoule
MTES	Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire
MW	Mégawatt
MWé	Mégawatt électrique
NOx	Oxyde d'azote
PBH	Plaquettes bocagères humides
PBS	Plaquettes bocagères sèches
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PEF	Product Environmental Footprint
PFH	Plaquettes forestières humides
PFS	Plaquettes forestières sèches
PPE	Programmation Pluriannuelle de l'Energie
PSH	Plaquettes de scierie humides
PSS	Plaquettes de scierie sèches
PUH	Plaquettes urbaines humides
PUS	Plaquettes urbaines sèches
SNCR	Réduction sélective non catalytique
SSD	Sortie de statut de déchets
UE/EU	Union européenne / European Union
UF/FU	Unité fonctionnelle / Functional unit

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols… - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'**ADEME**

FAITS ET CHIFFRES
L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.

CLÉS POUR AGIR
L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.

ILS L'ONT FAIT
L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.

EXPERTISES
L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard

HORIZONS
L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

EXPERTISES

ANALYSE DU CYCLE DE VIE DU BOIS ENERGIE COLLECTIF ET INDUSTRIEL