

ETUDE PRELIMINAIRE A LA REALISATION DE BILANS ENVIRONNEMENTAUX SUR LE CHAUFFAGE AU BOIS

Synthèse

Novembre 2015

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par :
FCBA (Claire Cornillier), CIRAD (Anthony Benoist), CNPF (Olivier Gleizes)
N° de contrat : 1401C0030

Coordination technique ADEME :

Alice GUEUDET

Miriam BUITRAGO

– Direction *Productions et Energies Durables* \ Service *Bioressources*
– Direction *Productions et Energies Durables* \ Service *Agriculture et Forêts*



SYNTHESE D'ETUDE

En partenariat avec :



REMERCIEMENTS

Nous remercions tout particulièrement Alice Gueudet (ADEME) et Miriam Buitrago (ADEME) pour leur forte et enrichissante implication technique dans la réalisation de cette étude.

Nous remercions également l'ensemble des membres du comité de suivi de l'étude :

- Marie April (ADEME) ;
- Frédéric Branger (MAAF) ;
- Gérard Deroubaix (FCBA) ;
- Alice Fautrad (ADEME) ;
- Isabelle Feix (ADEME) ;
- Julia Grimault (CDC climat) ;
- Martine Leclercq (MEDDE) ;
- Joseph Lunet (MEDDE) ;
- Azadeh Marzin (ADEME) ;
- Jérôme Mousset (ADEME) ;
- Olivier Picard (CNPFF) ;
- Jean-Christophe Pouet (ADEME) ;
- Caroline Rantien (ADEME) ;
- Olivier Réthoré (ADEME) ;
- Julie Thomas (CNPFF) ;
- Murielle Trouillet (MAAF) ;
- Estelle Vial (FCBA) ; et
- Lise Wlérick (MAAF).

Enfin, les auteurs remercient leurs collègues du groupe de recherche ELSA (Environmental Lifecycle and Sustainability Assessment), de l'unité de recherche BioWooEB (Biomasse, Bois, Energie, Bioproduits) du CIRAD, des pôles ENSA (Environnement Santé), EEP (Energie Economie Prospective) et BSA (Biotechnologie Sylviculture Avancée) de FCBA, pour les différents échanges et discussions qui ont eu lieu sur les thèmes abordés dans ce rapport et qui ont permis d'enrichir et d'améliorer celui-ci.

CITATION DE ce rapport

ADEME. Cornillier Claire, Benoist Anthony, Gleizes Olivier. 2015. Etude préliminaire à la réalisation de bilans environnementaux sur le chauffage au bois – Synthèse. 21 p.

En français :

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.

En anglais :

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

Table des matières

1. Contexte de l'étude	4
2. Démarche adoptée	5
3. Détermination des frontières du système.....	6
3.1. Placement de la frontière technosphère/écosphère selon le type de forêt	6
3.2. Détermination des processus inclus dans les frontières du système selon les objectifs de l'étude.....	7
4. Prise en compte des effets du cycle du carbone biogénique sur le changement climatique	11
5. Besoins et perspectives en termes de travaux futurs	16
Index des tableaux et figures	18
Sigles et acronymes	19

1. Contexte de l'étude

Le bois-énergie constitue aujourd'hui la première source d'énergies renouvelables en France (8,8 Mtep en 2014, soit 39% de la production primaire d'énergies renouvelables, soit 15% du bouquet énergétique)¹ et devrait contribuer largement à l'effort nécessaire pour atteindre les objectifs de part d'énergies renouvelables de la France à 2020 fixés à 23% (directive 2009/28/CE du 29 avril 2009). En effet, la Programmation Pluriannuelle des Investissements prévoit une production primaire d'énergie à partir de biomasse de 16 Mtep en 2020, soit une augmentation d'environ 40% pour le bois par rapport à 2011, grâce notamment à un fort développement de la production de chaleur.

Le développement du bois-énergie répond à une problématique de dépendance énergétique mais également à des enjeux environnementaux et notamment climatiques. Au-delà d'un accompagnement technique et financier, son développement nécessite également de faire appel à de l'évaluation environnementale avec une approche globale comme le propose l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) pour répondre aux questions qu'il soulève.

Ainsi, l'ADEME a réalisé en 2005 un premier bilan environnemental du chauffage au bois dans les secteurs domestique, collectif et industriel. Ces évaluations se basaient notamment sur le principe de « neutralité carbone », c'est-à-dire l'hypothèse d'un équilibre global entre les émissions de CO₂ engendrées par la combustion du bois et les quantités de CO₂ absorbées lors de la croissance des arbres correspondant à ce bois consommé.

L'augmentation attendue de la demande en bois pour l'énergie pourrait amener à faire évoluer les pratiques sylvicoles, en particulier à intensifier les taux de récolte, que cela soit directement pour cet usage ou indirectement dans le cas où des besoins additionnels en bois énergie seraient couverts au détriment d'autres usages qui, à demande constante, seraient alors contraints de s'approvisionner ailleurs. Ces évolutions sylvicoles ont des incidences sur les stocks de carbone séquestrés dans les écosystèmes forestiers que le principe de la neutralité carbone ne permet pas de prendre en compte. L'intégration dans les ACV du cycle du carbone biogénique, notamment du potentiel de séquestration de carbone dans les écosystèmes forestiers, pose des questions méthodologiques (place des forêts dans la représentation systémique que propose l'ACV entre activité humaine et environnement naturel, dimensions spatio-temporelles pertinentes d'analyse des systèmes forestiers, impact de l'occupation et des changements d'usages des sols au sens large incluant des évolutions de pratiques sylvicoles comme la remise en production de forêts abandonnées ou la modification des durées de rotation, gestion de la multifonctionnalité des systèmes forestiers, ...). En outre, cette intégration nécessite de faire appel à des modélisations de systèmes forestiers, tâche s'avérant complexe. Ceux-ci présentent en effet des spécificités, liées à l'écologie, la gestion et la conservation des espaces boisés, qui sont difficiles à appréhender et dont la prise en compte en ACV reste aujourd'hui au stade de développement. Apporter des éléments de connaissances sur ces systèmes et proposer des recommandations méthodologiques pour mieux évaluer leur effet sur le changement climatique constituent un enjeu majeur de la présente étude.

Par ailleurs, l'ACV dans son approche a également fait l'objet ces dernières années de développements nouveaux (« approche conséquentielle » versus « approche attributionnelle »), complexifiant très significativement sa mise en œuvre et l'interprétation des résultats. Faciliter la compréhension de l'ensemble des approches disponibles, leur appropriation, et leur bonne utilisation, notamment pour les systèmes d'intérêt de l'étude, constitue l'autre enjeu majeur de cette étude, des choix méthodologiques non adaptés aux questions posées pouvant conduire à des conclusions erronées.

Enfin, dans ce contexte, à la fois de fort développement du bois-énergie, et de questionnement méthodologique sur son évaluation environnementale, il apparaît important de clarifier le débat et d'apporter des recommandations méthodologiques pour pouvoir répondre aux questions qui se posent :

- Quel est le bilan environnemental de l'énergie produite par une nouvelle chaudière ?
- Quel pourrait être l'effet sur le climat de l'augmentation de la production de chaleur à partir de bois en France pour atteindre les objectifs de 2020 en termes d'utilisation d'énergie renouvelable ?

Cette étude constitue ainsi l'étape préliminaire avant d'engager des actualisations ou la réalisation de nouvelles études ACV sur le chauffage au bois. Elle fournit d'une part, sur la base d'un état de l'art et d'un volet de mise en œuvre sur des cas d'étude, des recommandations pour mener aujourd'hui de telles évaluations, et identifie d'autre part les besoins de travaux de recherche pour les améliorer.

Le présent document tente d'en faire la synthèse, présentant à la fois l'approche adoptée et les principaux résultats.

¹ Chiffres clés des énergies renouvelables, éditions 2015, Commissariat général au développement durable, pp 31, 34
 ETUDE PRELIMINAIRE A LA REALISATION DE BILANS ENVIRONNEMENTAUX SUR LE CHAUFFAGE AU BOIS Page 4 sur 21

2. Démarche adoptée

Cette étude a été menée de façon concertée, pouvoirs publics, professionnels du secteur forestier, experts dans le domaine de l'ACV. Comme montré par la Figure 1, elle s'est déroulée en trois parties, sur une durée de 15 mois :

- La réalisation d'un état de l'art sur les principales difficultés méthodologiques rencontrées lors de la réalisation de bilans environnementaux par ACV dans le domaine du chauffage au bois ;
- Une mise en œuvre de méthodes de caractérisation d'impact sur le changement climatique sur des cas d'étude ; et
- L'établissement des recommandations méthodologiques pour réaliser des ACV dans le domaine du chauffage bois à destination des praticiens.

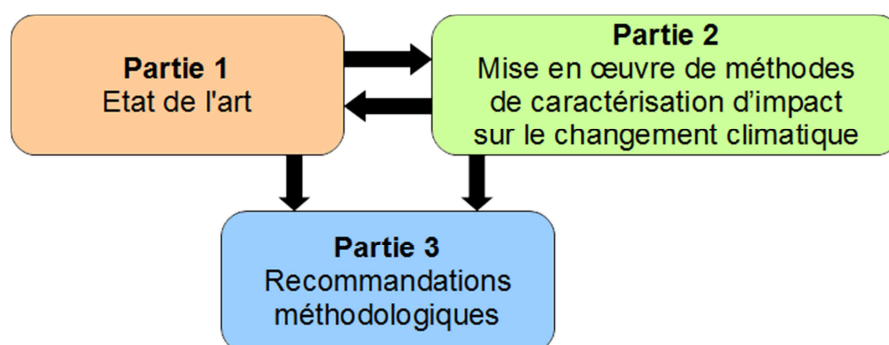


Figure 1 - Structure et démarche générale du projet

La réalisation de l'état de l'art a permis d'identifier les principales spécificités et difficultés méthodologiques liées à l'application de l'ACV aux systèmes de chauffage bois. Parmi celles-ci, la prise en compte du cycle du carbone biogénique pour l'évaluation des impacts ou bénéfices vis-à-vis du changement climatique s'est révélé un point crucial, qui a fait l'objet d'une partie dédiée, visant à mettre en œuvre certaines méthodes de caractérisation existantes sur des cas d'étude variés. Ces deux parties ont ensuite permis de formuler les principales recommandations méthodologiques pour la réalisation de bilans environnementaux sur le chauffage au bois.

Cette synthèse de l'étude reprend les résultats de ces trois parties, en focalisant sur deux points transversaux majeurs :

- La définition des frontières du système, selon le type de forêt étudiée et les objectifs de l'étude ; et
- La prise en compte des effets du cycle du carbone biogénique sur le changement climatique.

Le détail de ces deux points est disponible dans les rapports spécifiques des trois parties de cette étude. D'autres éléments, tels que l'utilisation de ressources en systèmes forestiers, la qualité de l'air extérieur, ou la sensibilité des méthodes de caractérisation d'impact sur le changement climatique à différentes hypothèses, considérés au cours de l'étude mais non repris ici, sont également traités dans ces rapports.

3. Détermination des frontières du système

L'ACV s'inscrit dans une approche et un mode de représentation systémiques du monde. De ce point de vue, le système à étudier s'inscrit dans le monde économique, appelé également technosphère en ACV et constitué de l'ensemble des activités anthropiques, lui-même s'inscrivant dans son environnement naturel, appelé également écosphère en ACV et incluant l'atmosphère, la biosphère, et la lithosphère (voir Figure 2). L'ACV cherche ainsi à évaluer les impacts sur l'écosphère d'un système appartenant à la technosphère.

La détermination des processus inclus dans les frontières du système a une influence forte sur les résultats de l'évaluation. L'approche adoptée pour déterminer ces processus et la manière de les décrire peuvent répondre à des logiques différentes, qui ont fait l'objet de développements ces dernières années. Une des difficultés majeures en ACV réside dans l'explicitation et la compréhension de l'ensemble de ces logiques pour leur bonne utilisation. Ainsi l'étude a cherché à faire la synthèse des travaux existants sur le sujet, notamment ceux réalisés par l'ILCD, ainsi qu'à répondre à des questions plus spécifiques qui se posent en matière de définition des frontières pour les processus forestiers.

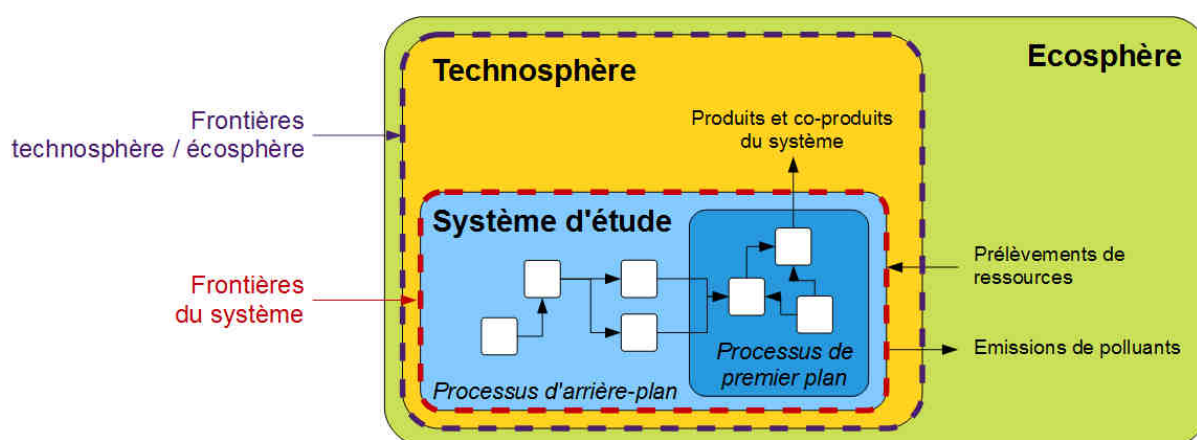


Figure 2 - Représentation simplifiée de l'approche systémique en ACV et des interactions entre systèmes (adaptée de (Jolliet et al., 2010))

3.1. Placement de la frontière technosphère/écosphère selon le type de forêt

Les processus forestiers reposent sur la biosphère. A ce titre, se pose la question de leur inclusion dans la technosphère. A partir des travaux existant pour qualifier si une activité basée sur la biosphère relève d'une activité humaine, des critères permettant de distinguer une forêt anthropique relevant de la technosphère de celle non anthropique relevant de l'écosphère ont été établis dans le cadre de l'étude. Il est proposé pour effectuer cette distinction de se baser essentiellement sur la notion de gestion, quels qu'en soient les objectifs (production de bois, conservation, protection, récréation, paysage, ...). Dans ce cadre il a été précisé que la récolte de bois relevait toujours d'une activité humaine à inclure dans les frontières du système. La plus part d'entre elles, comme les éclaircies, les coupes d'ensemencement, les coupes de maturité, relèvent également de la gestion sylvicole, rendant les peuplements anthropiques. Selon ces propositions, seules les forêts primaires, ainsi que les peuplements spontanés non gérés seraient à considérer comme forêts non anthropiques.

Il faut noter à ce stade que l'étude s'est concentrée par la suite sur le cas des forêts anthropiques, considérant que la majeure partie des espaces boisés en France faisait l'objet de gestion, quel qu'en soit le degré.

Dans le cas d'approvisionnement bois provenant de forêts anthropiques, l'occupation forestière est donc à inclure dans les frontières du système. Une description en est alors nécessaire. Cette description peut s'effectuer de différentes manières (parcelle versus ensemble de parcelles, cycle versus horizon fixé ou infini, théorique versus spatialisée) avec des conséquences sur les éléments d'intérêt que sont les stocks de carbone biogénique et la productivité en bois. Il est possible d'en distinguer deux approches, présentant chacune des intérêts et inconvénients :

- La parcelle produisant la biomasse d'intérêt : cette approche permet de prendre en compte les interactions biologiques entre les arbres existant à l'échelle d'un peuplement, de déterminer un stock moyen et une productivité moyenne sur une révolution, représentatif également d'un ensemble de parcelles à l'équilibre, ainsi

que de décrire des variations de stocks indépendantes de l'échelle spatiale considérée ; sa description sous la forme d'une succession d'occupations, nécessaire pour la prise en compte de l'usage du sol en ACV, est aisée ; en revanche, elle ne permet pas de tenir compte d'un déséquilibre dans la distribution des classes d'âge qui peut s'observer à l'échelle d'un territoire ;

- Un ensemble de parcelles produisant la biomasse d'intérêt : cette approche permet de tenir compte de la distribution des classes d'âge sur un territoire considéré, mais les résultats sont dépendants de l'échelle spatio-temporelle retenue et donc non généralisables ; par ailleurs avec cette approche, la description du système présente des difficultés supérieures à celles rencontrées avec l'approche à la parcelle, de façon générale et en particulier pour répondre au cadre conceptuel de la prise en compte de l'usage du sol en ACV décrite sous la forme d'une succession d'occupations.

L'approche à la parcelle, la plus aisée, la plus générique et la plus appliquée (EcoInvent, FCBA), est celle qui a été retenue dans le cadre du volet mise en œuvre sur :

- Une révolution, en approche attributionnelle ;
- L'infini, en approche conséquentielle.

3.2. Détermination des processus inclus dans les frontières du système selon les objectifs de l'étude

Ces dernières années, l'ACV a fait l'objet de développements importants dans son approche, concernant notamment les logiques de détermination des processus inclus dans les frontières du système. L'origine de ces développements s'explique principalement par un élargissement du domaine d'application de l'ACV qui, initialement restreint à l'éco-conception d'un produit, a été par la suite étendu à l'évaluation de décisions d'ampleurs plus importantes.

Ceci a conduit à distinguer aujourd'hui deux grands types d'approche :

- L'approche attributionnelle, qui vise à décrire le système d'étude et ses impacts environnementaux, en lui attribuant une part des impacts dus à l'ensemble de la technosphère ;
- L'approche conséquentielle, qui a pour ambition d'évaluer les impacts des conséquences, sur l'ensemble de la technosphère, d'une décision appliquée au système d'étude.

Ces différentes approches influencent notamment le choix des processus inclus dans les frontières du système à travers deux prismes :

- La définition des frontières du cycle de vie du produit d'intérêt ;
- La gestion de la multifonctionnalité² de certaines étapes du cycle de vie du produit étudié.

En ce qui concerne la définition des frontières du cycle de vie du produit d'intérêt :

- Avec l'approche attributionnelle, les processus sont limités à ceux du cycle de vie du produit d'intérêt ;
- Avec l'approche conséquentielle, aux processus du cycle de vie du produit d'intérêt s'ajoutent ceux de la technosphère affectés par les conséquences à grande échelle de la décision étudiée, comme par exemple le remplacement d'un produit par un autre, ou encore une modification des infrastructures de production entraînée par cette décision.

En ce qui concerne la gestion de multifonctionnalité des processus, selon les recommandations de l'ILCD :

- Avec l'approche attributionnelle, la multifonctionnalité est résolue par une règle d'affectation³ répartissant les impacts générés par le processus entre les différentes fonctions qu'il rend, sans conséquence sur les frontières du système ;

² Certains processus peuvent fournir au-delà du flux d'intérêt, des co-produits courant à rendre une autre fonction que celle étudiée ; c'est par exemple le cas des processus forestiers qui fournissent des bois pour différents usages (bois d'œuvre, bois d'industrie, bois énergie) ou encore de l'étape de sciage avec la co-production de connexes ; les processus peuvent par ailleurs générer des déchets qui par leur recyclage (matière ou énergie) participent également à fournir un autre service ; un des principes fondamentaux de l'ACV est d'exprimer des résultats par rapport à une fonction principale fournie par le système d'étude, notion particulièrement importante pour comparer des systèmes entre eux ; s'il y a multifonctionnalité, il est donc nécessaire de trouver des règles comptables permettant la résoudre.

³ Recommandation divergente par rapport à celle des ISO 14040 et 14044, qui privilégie la solution par expansion du système quelle que soit l'approche

- Avec l'approche conséquentielle, la multifonctionnalité est résolue par élargissement du système aux co-fonctions non requises ; au bilan du système est alors soustrait l'impact du système permettant de fournir de manière alternative ces co-fonctions ; cette solution a en revanche pour conséquences de toucher aux frontières du système.

Le choix de l'approche à adopter en matière de définition des frontières du cycle de vie du produit d'étude, ainsi que de gestion de la multifonctionnalité, doit se faire au regard des objectifs de l'étude. Des travaux, en particulier ceux de l'ILCD, ont cherché à proposer une grille d'analyse des objectifs de l'étude permettant d'établir une typologie de situations pour lesquelles il est possible de formuler des règles communes, notamment sur ces deux aspects (voir Tableau 1). Ces propositions ont été explicitées dans l'état de l'art, et reprises dans les recommandations pour la réalisation d'ACV dans le domaine du chauffage bois, mettant ainsi en exergue le rôle essentiel de l'étape de définition et d'analyse des objectifs de l'étude dans la réalisation d'une ACV. Cette grille d'analyse des objectifs, représentée par un arbre de sélection en Figure 2, conduit à distinguer quatre situations en fonction de l'utilisation visée des résultats de l'évaluation, ainsi que :

- S'il s'agit d'utiliser les résultats pour de l'aide à la décision (choix d'éco-conception, orientation de politique promotionnelle, ...), de l'ampleur des conséquences de celle-ci ;
- S'il s'agit d'utiliser les résultats pour effectuer de la pure comptabilité (déclaration environnementale produit), des ambitions de l'étude d'inclure ou non des interactions avec d'autres systèmes.

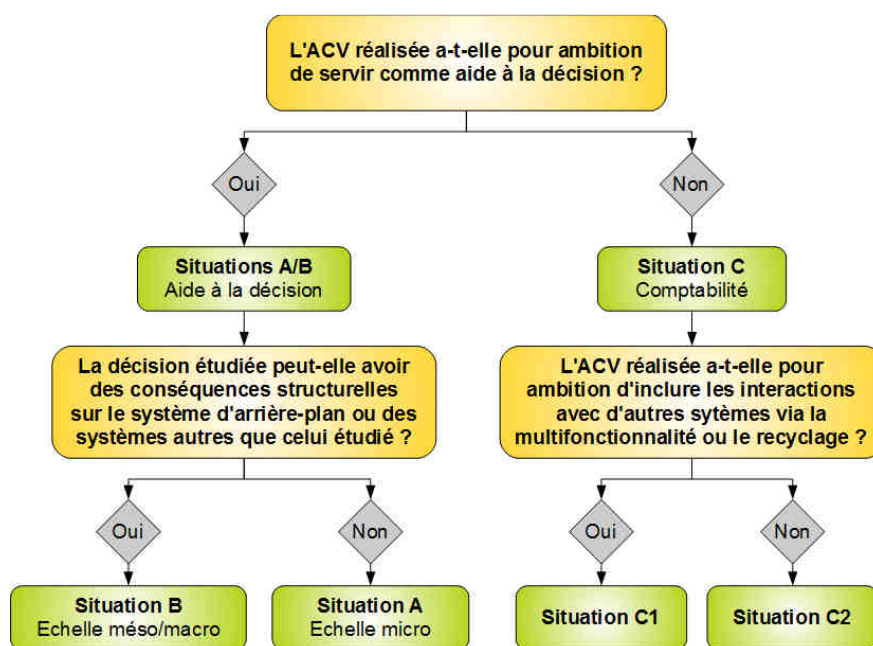


Figure 3 - Arbre de sélection du type de situation d'une étude ACV (adapté de (EC-JRC, 2010))

Afin de clarifier cette typologie, ces situations peuvent être illustrées de la façon suivante :

- Situation B d'aide à la décision d'échelle méso / macro : Orientation d'une politique nationale de soutien et de développement de l'utilisation de bois pour l'énergie ; l'étude d'ACV correspondante s'attache à appuyer une décision, concernant en l'occurrence les choix à réaliser pour soutenir et promouvoir l'utilisation de bois pour l'énergie ; l'objectif étant alors généralement de modifier durablement l'approvisionnement énergétique national, il peut être considéré que les conséquences attendues d'une telle décision soient structurelles ;
- Situation A d'aide à la décision d'échelle micro :
 - Développement d'un écolabel pour les granulés de bois commercialisés : L'étude d'ACV correspondante s'inscrit dans l'aide à la décision dans le sens où l'écolabel à mettre en place a pour objectif d'orienter les choix d'achat des consommateurs ; toutefois, il peut être considéré que ces décisions de consommateurs, même cumulées, ne soient pas suffisantes pour modifier de façon très significative le marché et n'aient alors pas d'effet structurel sur l'approvisionnement en granulés de bois.

- Démarche d'écoconception pour la production de granulés de bois, à l'initiative d'un fabricant de granulés : L'étude d'ACV correspondante vise à aider le fabricant de granulés à choisir des innovations technologiques permettant d'améliorer les performances environnementales de sa production ; l'étude s'inscrit alors dans l'aide à la décision, mais il peut être considéré que les conséquences attendues se limitent à la chaîne de production étudiée et qu'il n'y ait de conséquence structurelle ni sur le marché du granulé, ni sur les pratiques d'exploitation forestière à l'origine du bois utilisé.
- Situation C de comptabilité environnementale :
 - Conformité d'une chaîne d'approvisionnement en plaquettes forestières à des critères de certification : L'étude d'ACV correspondante vise à décrire un système, afin de garantir sa conformité vis-à-vis de critères de certification préalablement définis ; cette étude relève alors de la description et du contrôle et ne constitue donc pas une aide à la décision ; dans le référentiel de certification il est nécessaire de préciser si la prise en compte des co-produits comme les sciages fabriqués avec les connexes de scierie rentrant dans la fabrication des granulés doit se faire par élargissement du système (situation C1) ou par affectation économique (situation C2).
 - Conformité de la chaleur produite en 2015 par une chaufferie au critère relatif à la réduction de GES de la directive 2009/28/CE : Cette directive impose le cadre de réalisation de l'étude en situation C2 ; les problèmes de multifonctionnalité sont notamment à résoudre selon cette directive par affectation énergétique.

Il faut noter que pour les questionnements autour de l'installation d'une nouvelle chaudière bois :

- Si l'objectif de l'ACV est d'aider à prendre la décision de soutenir financièrement sa création, dans la mesure où celle-ci rentre dans une politique globale de soutien du bois énergie, le niveau pertinent d'analyse n'est pas une installation mais l'ensemble des installations prévues dans le plan de soutien. L'étude se place alors en situation B et est similaire à l'exemple donné ci-dessus.
- Si l'objectif de l'étude ACV est d'avoir une démarche d'éco-conception de la chaîne des processus permettant la conversion énergétique de la biomasse, l'étude se place en situation A s'il peut être considéré que les conséquences attendues se limitent à la chaîne de production étudiée et qu'il n'y ait de conséquence structurelle ni sur le marché de l'énergie étudiée, ni sur les pratiques forestières à l'origine du biomasse utilisée ; dans le cas inverse, l'étude pourrait se placer en situation B.

Pour chacune de ces situations, l'ILCD a établi des recommandations communes (voir Tableau 1) notamment sur les approches à adopter en matière de définition des frontières du cycle de vie du produit d'étude et de la gestion de la multifonctionnalité, proposant suivant la situation des approches mixtes. Le Tableau 1 montre ainsi que :

- Seule la situation B nécessite d'appliquer une approche conséquentielle sur l'ensemble des choix méthodologiques, et donc l'enjeu majeur pour être en mesure de décider s'il est nécessaire de mettre en œuvre une telle approche est la mise au point de méthodes de détermination des conséquences de la décision étudiée ; il faut noter que c'est la seule approche qui permette de prendre le remplacement d'une fonction rendue par un produit par un autre, et le détournement d'un usage d'une ressource vers un autre usage ;
- La situation A et C1 sont des situations hybrides, mixant une approche attributionnelle dans la définition des frontières du produit d'intérêt et une approche conséquentielle dans la résolution de la multifonctionnalité, permettant ainsi pour des systèmes de chauffage bois de différencier au sein d'un même système forestier le bilan de la production de BO et de celui de la production du BIBE, bilan qui serait identique en situation C2 ; il en sera de même pour le bilan de la chaleur produite à partir de connexes de scierie par rapport à celui obtenu en situation C2, comme pour la chaleur produite avec de la cogénération ; il faut noter que ces situations ne permettent cependant pas de prendre en compte dans le bilan de la chaleur produite d'éventuels détournements de BO au profit d'un usage énergétique, les interactions avec d'autres systèmes se limitant à la gestion de la multifonctionnalité ;
- La situation C2 correspond à l'approche attributionnelle sur l'ensemble des choix ; il faut noter que cette approche permet comme toutes les autres situations de prendre en compte les impacts de changement d'usage des sols ; ces impacts peuvent englober des évolutions de pratiques sylvicoles comme la récolte de rémanents ; ils sont limités à ceux des processus inclus dans les frontières du système.

	Type d'objectif de l'étude ACV à réaliser			
	<i>Situation B</i>	<i>Situation A</i>	<i>Situation C1</i>	<i>Situation C2</i>
Définition des frontières du système	Cycle de vie du produit d'intérêt, et processus de la technosphère affectés par les conséquences à grande échelle de la décision étudiée	Cycle de vie du produit d'intérêt		
Gestion de la multifonctionnalité⁽¹⁾	Elargissement du système, avec processus substitué déterminé selon les spécifications ci-dessous			Affectation
	Evolution marginale du marché	Mix moyen du marché		
Frontières résultantes du système	Cycle de vie du produit d'intérêt + des processus affectés par les conséquences de la décision étudiée + processus substitués par les co-produits et déchets valorisés	Cycle de vie du produit d'intérêt + processus substitués par les co-produits et déchets valorisés		Cycle de vie du produit d'intérêt

Légende :

- : Choix méthodologique relevant d'une approche conséquentielle
- : Choix méthodologique relevant d'une approche attributionnelle
- : Choix méthodologique relevant d'une approche hybride attributionnelle / conséquentielle

⁽¹⁾ : Préférence à appliquer dans le cas où la subdivision des processus n'est pas suffisante.

Tableau 1 –Recommandations en matière de frontières du système selon la situation de l'étude (adapté de (EC-JRC, 2010))

4. Prise en compte des effets du cycle du carbone biogénique sur le changement climatique

L'évaluation de l'impact, positif ou négatif, des systèmes de chauffage au bois vis-à-vis du changement climatique est un sujet controversé dans la littérature, du fait principalement des particularités du cycle du carbone biogénique, c'est-à-dire des échanges de carbone existant entre l'atmosphère et la biosphère. En effet, la biosphère est, avec les océans, l'un des deux réservoirs de carbone les plus actifs à l'échelle globale, et son rôle de puits ou de source de carbone est étroitement lié aux activités humaines, via l'occupation et la gestion des terres.

Différentes méthodes ont été développées pour prendre en compte les spécificités de ce cycle du carbone biogénique en ACV, selon différents principes, différentes hypothèses et pour représenter différents mécanismes. Sur cet enjeu particulier du projet, les objectifs spécifiques du travail réalisé ont donc été de clarifier le panorama de méthodes et d'approches existantes dans la littérature, d'analyser leurs intérêts et inconvénients respectifs, et de mettre en œuvre les méthodes les plus intéressantes sur des cas concrets, afin de pouvoir établir des recommandations pertinentes aussi bien sur le plan théorique que sur le plan opérationnel.

Afin de mieux comprendre la diversité des méthodes existantes, deux mécanismes environnementaux distincts ont été considérés dans le cadre de cette étude :

- L'émission de gaz à effet de serre, qui, pour certaines méthodes, inclut également les captations de CO₂.
- L'usage des sols, qui vise à traduire, à travers la prise en compte du potentiel de séquestration de carbone d'un sol (incluant le sol et la litière, les biomasses mortes et vivantes, souterraines et aériennes), différents échanges, réels ou potentiels, ayant lieu au niveau d'un sol : respiration et activité photosynthétique des végétaux, dégradation de biomasse morte, transfert de carbone via le prélèvement de produits forestiers, et effet de la présence humaine sur le stock de carbone de ce sol en comparaison au potentiel de séquestration d'un usage de référence. Ce mécanisme peut couvrir deux processus différents :
 - La transformation, incluant aussi bien les changements d'usages des sols que les changements de pratiques de gestion, et considérant l'effet de ces changements sur le potentiel de séquestration de carbone ; ce processus est d'un intérêt tout particulier pour l'étude du développement des filières de bois-énergie, comme il a pu être rappelé en section 1.
 - L'occupation, couvrant à la fois les variations réelles de stock de carbone d'un sol au cours de son occupation, et le maintien de ce stock de carbone, du fait de l'activité humaine étudiée, à un niveau différent du potentiel de séquestration de carbone qui pourrait être atteint par un usage de référence.

Ce mécanisme d'usage des sols tient compte du potentiel de séquestration de carbone d'un sol, ce qui couvre certaines émissions de gaz à effet de serre. Il se distingue pourtant du mécanisme d'émission de gaz à effet de serre par deux aspects principaux :

- Le mécanisme d'usage des sols permet de prendre en compte de façon plus globale le rôle de la biosphère en tant que puits de carbone, en considérant notamment l'impact, positif ou négatif, des activités humaines sur celui-ci, en comparaison à un usage de référence ; et
- La prise en compte des émissions et captations de gaz à effet de serre dues à des variations de stocks de carbone par le mécanisme d'usage des sols permet de prendre en compte deux spécificités par rapport aux émissions de gaz à effet de serre d'origine fossile :
 - Leur réversibilité, signifiant que si aucun effet de seuil n'est atteint, toute action bénéfique ou néfaste sur le stock de carbone d'un sol peut être neutralisée dans le futur par une action contraire, et
 - Leur caractère dynamique, considérant que les dynamiques de variations de stock de carbone, pouvant se dérouler sur plusieurs décennies, peuvent avoir un effet sur le système climatique.

Dans le cas de forêts anthropiques, les travaux menés dans le cadre de ce projet ont conduit à recommander de bien prendre en compte et de bien différencier ces deux mécanismes. Par conséquent il n'est pas recommandé de prendre en compte les échanges de gaz à effet de serre ayant lieu en forêt selon des méthodes développées pour l'émission de gaz à effet de serre. Ceci est exprimé par la Figure 4, représentant le cadre général, proposé par cette étude, de prise en compte des effets du cycle du carbone biogénique sur le changement climatique dans le cas de forêts anthropiques. Ce cadre tient compte de la captation de CO₂ due à la biomasse forestière récoltée, sur la base de sa teneur en carbone, afin d'éviter un double comptage entre le transfert de stock de carbone en forêt dû au prélèvement de cette biomasse et l'émission de gaz à effet de serre lors de la valorisation ou la dégradation de cette biomasse.

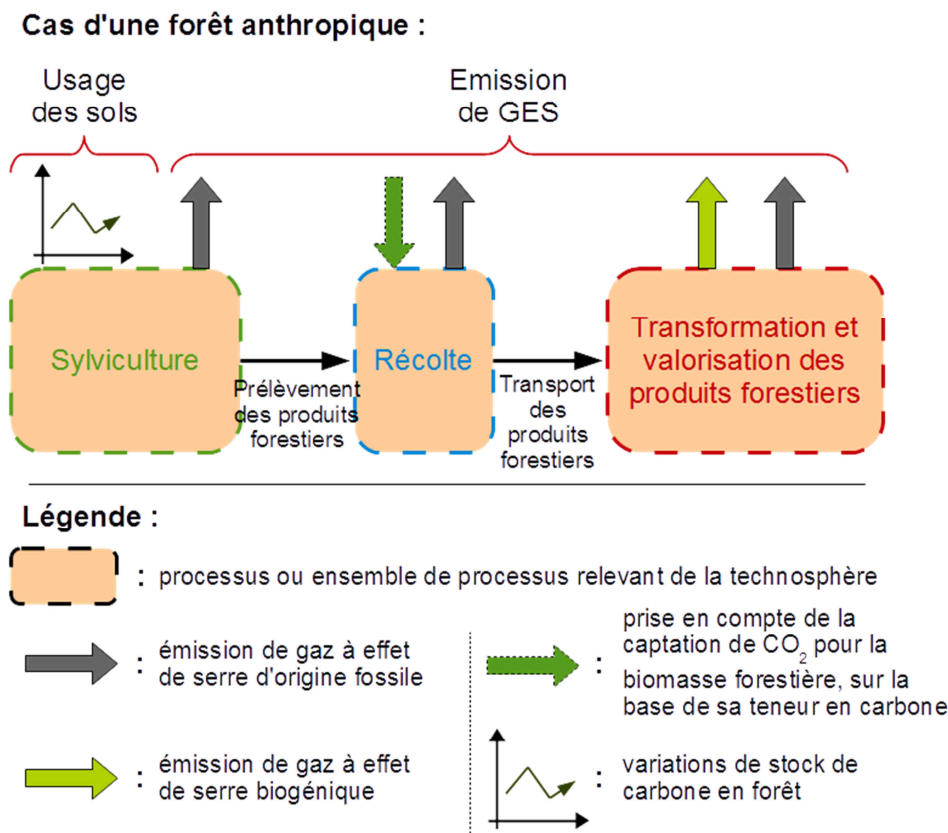


Figure 4 - Cadre général de prise en compte des effets du cycle du carbone biogénique sur le changement climatique, proposé et recommandé par cette étude dans le cas de forêts anthropiques

La revue de la littérature réalisée lors de cette étude a permis d'identifier sept méthodes ou approches différentes développées pour prendre en compte en ACV l'effet du cycle du carbone biogénique sur le changement climatique, via l'un ou l'autre des mécanismes présentés en Figure 4. Une méthode supplémentaire, relevant de l'usage des sols, a été développée au cours de ce projet. Ces huit méthodes sont décrites succinctement dans le Tableau 2 suivant. Les principaux avantages et inconvénients listés dans ce tableau tiennent compte des résultats obtenus lors des phases d'état de l'art et de mise en œuvre de méthodes de caractérisation d'impact sur le changement climatique.

La plupart de ces méthodes reposent sur les travaux du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) et leur définition de Pouvoirs de Réchauffement Global (PRG). Ces PRG permettent de caractériser et comparer l'effet de différentes émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), en considérant leur effet sur le bilan radiatif terrestre, cumulé sur une période donnée, 20 ou 100 ans d'après le cinquième rapport d'évaluation du GIEC publié en 2013.

Mécanisme environnemental décrit	Nom de la méthode	Principe général	Principaux avantages relevés	Principaux inconvénients relevés
Emission de gaz à effet de serre	Neutralité C	Approche d'application des PRG considérant que toute émission de carbone biogénique peut être caractérisée en même temps que la captation de CO ₂ à laquelle elle correspond	Méthode la plus simple d'utilisation	Méthode fortement critiquée dans la littérature pour son caractère extrêmement simplificateur
	Comptabilité totale	Approche d'application des PRG considérant indépendamment les émissions de carbone biogénique et les captations de CO ₂	Méthode simple d'utilisation	Méthode ne permettant pas une caractérisation dynamique du cycle du carbone biogénique
			Méthode recommandée par de nombreux guides ou référentiels ACV	
	PRG ajustés dans le temps	Méthode reposant sur l'approche de comptabilité totale et différenciant l'impact climatique d'émissions ou de captations de GES selon leur année d'émission	Méthode permettant une caractérisation dynamique du cycle du carbone biogénique, satisfaisante sur le plan scientifique	Méthode difficile à mettre en œuvre en pratique
			Méthode pleinement compatible avec les enjeux des matériaux biosourcés	Méthode ne permettant pas une comparaison simple de systèmes
	PRG biogéniques	Méthode différenciant émissions de CO ₂ fossile et biogénique en tenant compte pour ces dernières de la dynamique de repousse de la plante dont elles sont issues	Méthode permettant une caractérisation dynamique du cycle du carbone biogénique	Méthode dont les raisonnements de calcul ne sont pas pleinement satisfaisants sur le plan scientifique
Méthode incompatible avec l'approche attributionnelle				
			Non applicable au CH ₄	
Facteurs EPA « réduits »	Méthode définissant un facteur de pondération des émissions de CO ₂ biogénique basé sur la comparaison entre carbone capté et carbone récolté à l'échelle d'un massif forestier	Aucun avantage marquant identifié	Méthode dont les raisonnements de calcul ne sont pas pleinement satisfaisants sur le plan scientifique	
			Non applicable au CH ₄	
Usage des sols, transformation uniquement	Conversion ILCD	Méthode assimilant une variation de stock de carbone due à une transformation à un flux de CO ₂ , sans prise en compte de son caractère dynamique ou réversible	Méthode simple d'utilisation	Méthode ne permettant pas une caractérisation dynamique du cycle du carbone biogénique
			Méthode recommandée par de nombreux guides ou référentiels ACV	

Usage des sols, transformation et occupation	Usage des sols Müller-Wenk	Méthode considérant toutes les variations de stock de carbone relevant de l'usage des sols, en les assimilant à des flux de CO ₂ , pondérés par un facteur comparant la dynamique de ces variations à la dynamique de dégradation du CO ₂ dans l'atmosphère	Méthode permettant une caractérisation dynamique du cycle du carbone biogénique	Méthode dont les raisonnements de calcul ne sont pas pleinement satisfaisants sur le plan scientifique
			Méthode simple d'utilisation	
	Usage des sols Projet	Méthode considérant toutes les variations de stock de carbone relevant de l'usage des sols, en assimilant chaque variation annuelle à un flux de CO ₂ , dont l'impact est évalué par les PRG ajustés dans le temps	Méthode permettant une caractérisation dynamique du cycle du carbone biogénique, satisfaisante sur le plan scientifique	Méthode développée au cours du projet, nécessitant une étude plus approfondie
			Méthode simple d'utilisation	

Tableau 2 - Synthèse des principes et des principaux avantages et inconvénients des méthodes de prise en compte du cycle du carbone biogénique considérées dans le cadre de cette étude

L'indicateur du temps de retour en GES a également été considéré au cours du projet. Celui-ci vise à exprimer le nombre d'années nécessaire pour que l'effet de substitution d'une énergie fossile par un système de biomasse-énergie compense, d'un pont de vue carbone, l'impact d'une potentielle transformation d'usage des sols. Il se calcule alors en comparant l'économie annuelle de GES due à la substitution d'une énergie fossile par la biomasse-énergie, déterminée par ACV selon la neutralité C ou la comptabilité totale, à l'émission de CO₂ due à une transformation d'usage des sols, calculée selon la conversion ILCD. Cet indicateur ne constitue pas une méthode de caractérisation des impacts à proprement parler, mais un indicateur supplémentaire, formalisé de façon différente que les indicateurs ACV et dédié aux impacts de transformation en vue de faciliter leur interprétation. D'un point de vue méthodologique, cet indicateur ne peut être utilisé qu'en approche conséquentielle, s'il peut être clairement établi que la production de biomasse-énergie étudiée a causé la transformation d'usage des sols.

Parmi les différentes méthodes présentées dans le Tableau 2, trois ont été exclues de la phase de mise en œuvre du projet pour leur manque d'intérêt vis-à-vis des objectifs du projet : la neutralité C, les PRG biogéniques, et les facteurs EPA. En vue de leur application à des cas concrets, les cinq méthodes restantes retenues ont été combinées afin d'homogénéiser au mieux les mécanismes environnementaux couverts sans créer d'incohérence entre les différents principes de ces méthodes. Quatre combinaisons ont alors été obtenues : Comptabilité totale + Conversion ILCD ; Comptabilité totale + Usage des sols Müller-Wenk ; Comptabilité totale + Usage des sols Projet ; et PRG ajustés dans le temps + Usage des sols Projet.

Ces différentes méthodes et leurs combinaisons ont alors été utilisées :

- En approche attributionnelle, sur la production de chaleur à partir de biomasse forestière issue de quinze origines différentes (trois essences (douglas, eucalyptus, châtaigner) suivant différentes sylvicultures (taillis, TCR, futaie) avec ou sans évolution de pratiques sylvicoles (raccourcissement de la révolution, intensification de la récolte...)) ; et
- En approche conséquentielle, sur une évolution de récolte d'un TCR d'eucalyptus visant à produire de la chaleur.

Ces applications ont permis de tester la faisabilité de mise en œuvre de ces méthodes, ce qui a mis en valeur certaines difficultés opérationnelles et des limites non identifiées initialement, concernant notamment les PRG ajustés dans le temps. Au-delà de la faisabilité de mise en œuvre, ces évaluations ont également permis d'illustrer et de mieux comprendre les différences et points communs entre les différentes approches (attributionnelle et conséquentielle), et entre les différentes méthodes de caractérisation considérées.

Les résultats obtenus ont montré que la méthodologie ACV, quelle que soit l'approche, peut permettre avec certaines méthodes d'impact d'obtenir des résultats sensibles au système de production de biomasse via la prise en compte du cycle du carbone biogénique, ce que des méthodes telles que la neutralité carbone ne permettent pas. L'origine de cette sensibilité a été principalement attribuée au mécanisme d'usage des sols. Sur les cas étudiés, la prise en compte de la transformation (incluant les évolutions sylvicoles du type raccourcissement de la révolution) peut faire varier les résultats jusqu'à plus de 10 fois dans un sens ou dans l'autre. En ce qui concerne l'occupation, les effets observés sur

les cas testés sont également très significatifs. Enfin, la mise en œuvre de ces méthodes a souligné le besoin d'une description précise des systèmes de production de la biomasse forestière, faisant appel à de nombreuses données et modèles, pour lesquels les résultats peuvent être très sensibles.

Finalement, au terme de ces analyses théorique et pratique, les recommandations de ce projet en termes de méthodes de caractérisation permettant une prise en compte des effets du cycle du carbone biogénique sur le changement climatique ont pu être formulées. Ces recommandations sont synthétisées dans le Tableau 3 suivant, en accord avec le cadre général présenté à la Figure 4, et complétées par une évaluation de la pertinence de chaque modèle, selon l'échelle de notation utilisée dans le cadre des travaux de l'ILCD.

Mécanisme environnemental	Type de flux d'inventaire correspondant	Modèle de caractérisation recommandé	
		Nom du modèle	Evaluation de la pertinence du modèle
Emission de GES	Emission de GES d'origine fossile (en kg)	PRG à 100 ans en comptabilité totale	I
	Emission de GES biogénique et captation de CO ₂ (en kg)		
Usage des sols, processus de transformation	Transformation des sols (en ha)	Conversion ILCD	II
Usage des sols, processus d'occupation	Occupation des sols (en ha.an)	Aucun	N/A

I : Recommandé et satisfaisant

II : Recommandé, mais quelques améliorations requises

III : Recommandé, mais à appliquer avec précaution

Interim : Trop immature pour être recommandé

Tableau 3 - Synthèse des recommandations relatives à la prise en compte de l'effet du cycle du carbone biogénique sur le changement climatique

5. Besoins et perspectives en termes de travaux futurs

Différentes perspectives de travaux futurs ont pu être identifiées et mises en valeur au cours de ce projet. Ces besoins concernent notamment quatre points :

- La mise en œuvre d'approches conséquentielles.
La mise en œuvre d'études d'ACV conséquentielles nécessite la définition de scénarios prospectifs de développement du chauffage au bois, dont la mise au point dépasse le seul domaine de l'ACV. En effet, la construction de ces scénarios requiert un travail important de prospective économique pour mesurer comment évoluera la demande en produits forestiers, ainsi qu'une expertise forte en aménagement du territoire et en gestion forestière afin de déterminer comment la production forestière pourra répondre à cette nouvelle structure de la demande. Il est attendu que le couplage de ces différentes compétences et des différentes méthodes que celles-ci mobilisent nécessite un travail important de recherche. Selon l'objectif de l'étude et la portée des marchés considérés, cette analyse doit être conduite à l'échelle régionale, nationale, européenne ou internationale.
- Une réflexion à approfondir sur la manière d'intégrer les forêts anthropiques en ACV, en particulier concernant :
 - Les dimensions spatio-temporelles de l'occupation forestière à considérer en fonction des objectifs de l'étude.
 - La manière d'identifier le lien entre système étudié et évolution sylvicole (transformation en langage ACV) : cette étude a montré qu'en théorie l'ACV pouvait prendre en compte pour les forêts anthropiques les impacts d'une évolution sylvicole quelle que soit l'approche mais cela implique de pouvoir identifier qu'un système est à l'origine d'une évolution sylvicole ; une réflexion serait à mener sur la faisabilité d'établir ce lien de causalité, notamment à partir des informations disponibles actuellement. Ce point est particulièrement important pour l'étude du développement des filières biomasse énergie.
- La construction d'une base de données sur les stocks de carbone en forêt, différenciée par pratiques et incluant sol et biomasse.
La mise en œuvre des méthodes de caractérisation de l'effet du cycle du carbone biogénique sur le changement climatique a montré que toutes les méthodes existantes nécessitent de connaître les stocks de carbone à l'équilibre selon l'itinéraire sylvicole considéré (essence, station (conditions pédo-climatiques), structure, intensité des prélèvements, durée de révolution). En l'absence d'une base de données standardisée, l'accès à ces données s'est montré très difficile. De plus, les données disponibles actuellement considèrent généralement les usages forestiers de façon marginale, leur attribuant une seule valeur de stock, ne permettant pas de prendre en compte des évolutions de pratiques.
A cette connaissance du niveau potentiel de séquestration de carbone d'un sol, incluant tous les compartiments, s'ajoute pour les méthodes plus raffinées une caractérisation des dynamiques de stockage ou de déstockage. L'obtention de ces données repose généralement à la fois sur des relevés de terrain et de la modélisation de croissance de biomasse et de dynamique des sols.
Enfin, la construction d'une telle base de données nécessitera que soit réalisé le travail préalable sur les dimensions spatio-temporelles de l'occupation forestière à considérer (voir point précédent). En effet, ces deux échelles seront nécessairement des paramètres structurants de cette base de données.

- Un travail de recherche pour améliorer la pertinence de la caractérisation des impacts environnementaux liés à la gestion forestière.
Au cours de ce projet, différentes limites des modèles de caractérisation actuels ont été mises en valeur, sur principalement trois types de mécanismes environnementaux, liés de façon générale à l'usage des sols forestiers :
 - Concernant le changement climatique et la prise en compte des effets du cycle du carbone biogénique, les modèles visant à tenir compte des variations de stock de carbone en forêt se sont avérés lacunaires sur différents points (voir Tableau 2 et Tableau 3). La conversion ILCD, recommandée pour caractériser les processus de transformation en forêt anthropique, ne permet pas de tenir compte du caractère réversible et des dynamiques des variations de stock de carbone, qui sont pourtant les deux points clés de la prise en compte de l'usage des sols en ACV. Compte tenu des lacunes des méthodes actuelles, aucune méthode n'a pu être recommandée pour la prise en compte des processus d'occupation de forêts anthropiques. Un travail important est donc attendu pour développer la prise en compte de ces deux aspects de l'usage des sols.
 - L'évaluation de l'effet de l'utilisation de ressources en systèmes forestiers souffre également d'importantes limites. En forêts anthropiques, les travaux de l'ILCD mettent en valeur que le modèle préconisé actuellement, proposant un indicateur de potentiel de production de ressources biotiques basé sur la fertilité des sols, elle-même mesurée par la teneur en matières organiques des sols, est à appliquer avec une grande précaution.
 - Au-delà de la séquestration de carbone et de la mobilisation de ressource, un des enjeux essentiels de la prise en compte de l'usage des sols en ACV est l'évaluation des impacts ou bénéfices sur la biodiversité. Si quelques méthodes existent aujourd'hui pour prendre en compte cet aspect, aucune n'est jugée actuellement suffisamment mature pour être recommandée et utilisée.
 - Enfin, la présente étude n'a pas pu détailler l'évaluation des systèmes basés sur une biomasse issue de forêts non anthropiques. L'évaluation de l'exploitation de ces forêts est à aborder a priori de façon très différente de la gestion de forêts anthropiques. Or, en comparaison, la littérature scientifique est peu développée à ce sujet, et le traitement de ce cas nécessite donc la mise en place d'études dédiées.

Index des tableaux et figures

Tableaux

Tableau 1 –Recommandations en matière de frontières du système selon la situation de l'étude (adapté de (EC-JRC, 2010))	10
Tableau 2 - Synthèse des principes et des principaux avantages et inconvénients des méthodes de prise en compte du cycle du carbone biogénique considérées dans le cadre de cette étude	14
Tableau 3 - Synthèse des recommandations relatives à la prise en compte de l'effet du cycle du carbone biogénique sur le changement climatique.....	15

Figures

Figure 1 - Structure et démarche générale du projet	5
Figure 2 - Représentation simplifiée de l'approche systémique en ACV et des interactions entre systèmes (adaptée de (Jolliet et al., 2010))	6
Figure 3 - Arbre de sélection du type de situation d'une étude ACV (adapté de (EC-JRC, 2010))	8
Figure 4 - Cadre général de prise en compte des effets du cycle du carbone biogénique sur le changement climatique, proposé et recommandé par cette étude dans le cas de forêts anthropiques	12

Sigles et acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
ILCD	International reference Life Cycle Data system
PRG	Pouvoir de Réchauffement Global

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

www.ademe.fr



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

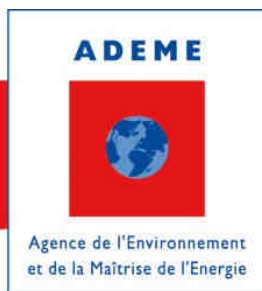
www.ademe.fr

ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development. The Agency provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work ADEME helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

ADEME is a public agency under the joint authority of the Ministry for Ecology, Sustainable Development and Energy, and the Ministry for Education, Higher Education and Research.

www.ademe.fr



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr