

Etude N°2023-01 Comptabilisation des GES biogéniques

Rapport final

Mai 2024

Version	2024-05-23	
Rédacteurs	Vérificateurs	Approbateurs
Lisa Duval (CIRAIG) Pablo Tirado Seco (CIRAIG)	Annie Levasseur (ÉTS) Julien Pedneault (CIRAIG) Nicolas Roy Heppell (CIRAIG)	François Saunier (CIRAIG)

Centre international de référence sur l'analyse du
cycle de vie et la transition durable (CIRAIG)
www.ciraig.org



L'association SCORE LCA est une structure d'étude et de recherche dédiée aux travaux relatifs à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et à la quantification environnementale. Elle vise à promouvoir et à organiser la collaboration entre entreprises, institutionnels et scientifiques afin de favoriser une évolution partagée et reconnue, aux niveaux européen et international, de la méthode d'Analyse du Cycle de Vie et de sa mise en pratique.

- En Bibliographie, ce document sera cité sous la référence :
SCORE LCA, Comptabilisation des GES biogéniques, 2024, 128 pages, n°01-2023.
- Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) : www.ademe.fr
- Les points de vue et recommandations exprimés dans ce document n'engagent que les auteurs et ne traduisent pas nécessairement, sauf mention contraire, l'opinion de l'ensemble des membres de SCORE LCA.
- Les informations et les conclusions présentées dans le présent document ont été établies au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

RÉSUMÉ

Défini de diverses façons dans la littérature, le carbone biogénique est caractérisé par une absorption de l'atmosphère par photosynthèse (séquestration) et par son appartenance au cycle court du carbone. En Analyse du Cycle de Vie (ACV), la comptabilisation du carbone biogénique est très discutée, mais peu harmonisée. Des approches différentes, voire contradictoires, sont recensées dans les guides, normes et réglementations en vigueur pour les différents secteurs de l'économie (biocarburant, plastiques biosourcés, construction, etc.). L'association ScoreLCA a mandaté le CIRAIG afin de réaliser une étude visant à identifier les enjeux méthodologiques et établir des recommandations pour la comptabilisation des gaz à effet de serre (GES) biogéniques en ACV.

Quatre principales approches de comptabilisation sont décrites et analysées de manière critique :

- l'approche « Inventaire = 0/0 », approche statique basée sur l'hypothèse de neutralité carbone, exclue les flux de GES biogéniques de l'inventaire ;
- l'approche « FC=0/0 », approche statique basée sur l'hypothèse de neutralité carbone, donne des facteurs de caractérisation nuls aux flux de CO₂ biogéniques ;
- l'approche « FC=-1/+1 », approche statique qui évalue les GES biogéniques comme les GES fossiles et considère un crédit à la séquestration ;
- les approches dynamiques qui visent à prendre en compte les aspects dynamiques généraux (moment de l'émission, évolution de l'impact au cours du temps...) ou plus spécifiques aux flux de GES biogéniques (stockage temporaire et période de rotation des cultures).

Plusieurs enjeux méthodologiques de ces approches sont davantage détaillés : choix qui influencent potentiellement la circulation des flux de carbone au sein du système et entre les systèmes de produit (frontières du système, multifonctionnalité et modèle de traçabilité) ; aspects temporels et stockage ; et enjeux liés à la quantification des flux d'inventaire liés à l'usage et la transformation des terres.

Les divergentes exigences réglementaires et normatives, le positionnement des acteurs publics et privés, ainsi que l'état de l'art au niveau des différents logiciels et bases de données disponibles en ACV ont été synthétisés. De plus, un éclairage sur l'évolution de la normalisation en la matière est donné.

Trois des quatre approches de comptabilisation du carbone biogénique sont testées dans une étude de cas comparant plusieurs matériaux contenant du carbone biogénique pour la construction d'un bâtiment : l'approche FC=0/0, l'approche FC=-1/+1 et plusieurs approches dynamiques. Un autre cas d'étude, la production de fruit de palmier à huile, est choisi pour illustrer l'importance d'adapter les flux d'inventaire liés à l'usage et la transformation des terres au contexte de l'étude. L'étude de cas fait notamment ressortir la complexité de résoudre les enjeux identifiés considérant les bases de données et les logiciels disponibles.

Enfin, des recommandations sont données :

- en général, l'approche de comptabilisation FC=-1/+1 est à privilégier ;
- des ajustements devraient être faits à la main par le praticien ou être implémentés par défaut dans les bases de données afin de corriger le bilan du carbone biogénique à l'échelle du processus et du système, potentiellement déséquilibré par les choix de frontières du système et d'allocation ;
- l'ACV dynamique ne devrait être considérée que lorsque pertinente pour le cas à l'étude et donne une information additionnelle distincte des résultats statiques pour la prise de décision ;
- les flux d'inventaires liés à l'impact sur le changement climatique de l'usage et la transformation des terres devraient toujours être inclus et ajustés au contexte de l'étude, et davantage de recherche et d'harmonisation des méthodes de calcul sont recommandées.

MOTS CLÉS

Carbone biogénique, changement climatique, méthodologie, ACV dynamique, usage et transformation des terres

SUMMARY

Defined in various ways in the literature, biogenic carbon is characterized by its absorption from the atmosphere through photosynthesis (sequestration) and by its belonging to the short carbon cycle. In Life Cycle Assessment (LCA), the accounting of biogenic carbon is much debated, but little harmonized. Different, even contradictory, approaches are found in current guides, standards and regulations for different sectors of the economy (biofuels, bio-based plastics, construction, etc.). The ScoreLCA association commissioned the CIRAIG to carry out a study in collaboration with a number of stakeholders, in order to identify the methodological challenges and establish recommendations for accounting for biogenic greenhouse gases (GHGs) in LCA.

Four main accounting approaches are described and critically analyzed:

- the "Inventory = 0/0" approach, a static approach based on the assumption of carbon neutrality, excludes biogenic GHG flows from the inventory;
- the " CF = 0/0 " approach, a static approach based on the assumption of carbon neutrality, gives a zero characterization factor to biogenic CO₂ flows;
- the " CF = -1/+1 " approach, a static approach that evaluates biogenic GHGs in the same way as fossil GHGs, and considers a credit for sequestration;
- dynamic approaches, which aim to take into account general dynamic aspects (time of emission, evolution of impact over time, etc.) or those more specific to biogenic GHG flows (temporary storage and crop rotation periods).

Several methodological aspects of these approaches are discussed in greater detail: choices that potentially influence the circulation of carbon flows within the system and between product systems (system boundaries, multifunctionality and traceability model); temporal and storage aspects ; and challenges related to quantifying inventory flows linked to land use and land use change.

The divergent regulatory and standard requirements, the positions of public and private stakeholders, and the state of the art in terms of the various LCA software and databases available are summarized. The report also sheds light on the evolution of standardization in this field.

Three of the four biogenic carbon accounting approaches are tested in a case study comparing several materials containing biogenic carbon for building construction: the CF = 0/0 approach, the CF = -1/+1 approach and several dynamic approaches. Another case study, oil palm fruit production, is chosen to illustrate the importance of tailoring inventory flows linked to land use and land use change to the context of the study. In particular, the case study highlights the complexity of resolving the issues identified using the available databases and software.

Lastly, some recommendations are made:

- in general, the CF = -1/+1 accounting approach is to be favoured;
- adjustments should be made manually by the practitioner, or implemented by default in databases, to correct the biogenic carbon balance at the process and system level, potentially unbalanced by choices of system boundaries and allocation;
- dynamic LCA should only be considered when relevant to the case under study, and provides additional information distinct from static results for decision-making ; and
- inventory flows related to the climate change impact of land use and land use change should always be included and adjusted to the context of the study, and further research and harmonization of calculation methods are recommended.

KEY WORDS

Biogenic carbon, climate change, methodology, dynamic LCA, land use and land use change

Table des matières

LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES ENCADRES.....	XI
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES	XII
1. CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE	13
1.1 CONTEXTE.....	13
1.2 OBJECTIFS	13
1.3 CONTENU DE L'ETUDE.....	13
2. ÉTAT DE L'ART SCIENTIFIQUE	15
2.1 CONTEXTE ET DEFINITION DES TERMES	15
2.1.1 <i>Introduction : le cycle du carbone</i>	15
2.1.2 <i>Définition du carbone biogénique</i>	16
2.1.3 <i>Le carbone biogénique en ACV : niveau inventaire</i>	18
2.1.4 <i>Le carbone biogénique en ACV : niveau impact</i>	19
2.2 DESCRIPTIONS DES PRINCIPALES APPROCHES DE COMPTABILISATION DU CARBONE BIOGENIQUE EN ACV	24
2.2.1 <i>Hypothèse de la neutralité carbone</i>	24
2.2.2 <i>Approche « Inventaire = 0/0 »</i>	26
2.2.3 <i>Approche « FC=0/0 »</i>	27
2.2.4 <i>Approche « FC = -1 /+1 »</i>	27
2.2.5 <i>Approche de comptabilisation dynamique</i>	28
2.3 ENJEUX METHODOLOGIQUES.....	32
2.3.1 <i>Suivi des flux de carbone</i>	32
2.3.2 <i>Aspect temporel/dynamique et stockage</i>	43
2.3.3 <i>Usage et transformation des terres (LULUC)</i>	50
3. ÉTAT DE L'ART DES EXIGENCES ET PRATIQUES DE COMPTABILISATION DU CARBONE BIOGENIQUE	58
3.1 ÉTAT DE L'ART DES EXIGENCES REGLEMENTAIRES ET NORMATIVES	58
3.2 ÉTAT DE L'ART DES PRATICIENS (BASES DE DONNEES ET LOGICIELS).....	59
3.3 ÉVOLUTION DES APPROCHES ET ENJEUX	61
4. ÉTUDE DE CAS	63
4.1 DESCRIPTION GENERALE DE L'ETUDE DE CAS	63
4.1.1 <i>Description du système à l'étude</i>	63
4.1.2 <i>Description des approches testées</i>	66
4.1.3 <i>Flux élémentaires et facteurs de caractérisation d'intérêt</i>	66
4.2 APPLICATION DE L'APPROCHE FC=0/0.....	69
4.3 APPLICATION DE L'APPROCHE FC=-1/+1.....	71
4.3.1 <i>Analyse des impacts sur les changements climatiques</i>	71
4.3.2 <i>Analyse de l'inventaire des flux de carbone biogénique</i>	73
4.3.3 <i>Identification des enjeux potentiellement à l'origine du déséquilibre entre carbone biogénique séquestré et émis</i>	76
4.3.4 <i>Stockage permanent de carbone biogénique</i>	77
4.3.5 <i>Multifonctionnalité</i>	78
4.3.6 <i>Autres problèmes liés à l'opérationnalisation</i> :.....	85
4.4 APPLICATION DE L'APPROCHE DYNAMIQUE.....	86
4.4.1 <i>Méthodes tonne.annee</i>	87

4.4.2	Méthode GWPbio.....	88
4.4.3	Méthode de comptabilisation dynamique	91
4.5	USAGE ET TRANSFORMATION DES TERRES (LULUC).....	94
4.5.1	Prise en compte des LULUC dans la base de données ecoinvent pour l'impact sur les changements climatiques.....	94
4.5.2	Enjeux des LULUC appliqués à un exemple	97
5.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	101
5.1	SYNTHESE DES ENJEUX TRAITES ET RECOMMANDATIONS.....	101
5.1.1	Approche de comptabilité.....	101
5.1.2	Suivi des flux de carbone : choix de frontières du système, multifonctionnalité et traçabilité (mass-balance)	103
5.1.3	Aspects temporels et stockage	105
5.1.4	Usage et transformation des terres	107
5.2	CONCLUSION	109
	RÉFÉRENCES.....	110
	ANNEXE 1 - EXIGENCES RÉGLEMENTAIRES ET NORMATIVES ET DU POSITIONNEMENT DES ACTEURS PUBLICS ET PRIVÉS POUR A COMPTABILISATION DES GES BIOGÉNIQUES	116
	ANNEXE 2 – DONNEES ET RESULTATS DE L'APPLICATION DES APPROCHES DYNAMIQUES AU CAS D'ETUDE	121
	INVENTAIRES DU CYCLE DE VIE DES FLUX D'AVANT-PLAN CONTENANT DU CARBONE POUR LES SCENARIOS BETON, BOIS ET BAMBOU	121
	APPLICATION DE LA METHODE TONNE.ANNEE (VERSION SIMPLIFIEE DE L'ILCD HANDBOOK) AUX FLUX D'AVANT-PLAN	124
	APPLICATION DE LA METHODE GWPBIO SIMPLIFIEE AUX FLUX D'AVANT-PLAN.....	127
	APPLICATION DE LA METHODE LEVASSEUR	128

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Principaux paramètres influençant le calcul et valeurs des PRG et PTG du CO ₂ , CH ₄ et CO fossiles (Forster et al., 2023b, 2023a).....	23
Tableau 2-2: Tableau récapitulatif des approches de comptabilisation du carbone biogénique, et de leurs avantages et inconvénients.....	30
Tableau 3-1 : Tableau synthétisant les exigences réglementaires et normatives et du positionnement des acteurs publics et privés pour a comptabilisation des GES biogéniques	58
Tableau 3-2: Tableau comparatif du traitement des enjeux étudiés par les principales bases de données d'ACV	59
Tableau 3-3 : Tableau comparatif du traitement des enjeux étudiés par les principales bases de données d'ACV	61
Tableau 4-1 : Liste des éléments de construction et leur durée de vie correspondante	65
Tableau 4-2 : Catégories d'impact et facteurs de caractérisation (FC) des méthodes IPCC GWP100 avec et sans la considération du CO ₂ biogénique	68
Tableau 4-3 : Bilan de carbone biogénique à l'échelle des trois systèmes (excluant les flux liés aux LULUC)	74
Tableau 4-4: Méthodes dynamiques sélectives et dynamiques appliquées à l'étude de cas	86
Tableau 4-5: Facteurs de caractérisation GWPbio pour différentes durées de stockage et période de rotation. Extrait de (Guest, Cherubini, et al., 2013)	89
Tableau 4-6: Facteurs de caractérisation pour chaque type de biomasse en fonction de la durée du stockage (tirés de (Guest, Cherubini, et al., 2013)).....	90
Tableau 4-7: Données et hypothèses utilisées	99

Liste des figures

Figure 2-1 : Réservoirs, processus et mécanismes clés qui déterminent les concentrations historiques et futures de CO ₂ et les rétroactions entre le carbone et le climat dans le système terrestre (reproduit de Canadell et al., 2023)).	16
Figure 2-2 : Chaîne de cause à effet du changement climatique liée à l'émission de gaz à effet de serre (reproduit de Levasseur et al., 2017).	21
Figure 2-3 : Principes de calcul des indicateurs GWP100 et GTP100 en CO ₂ équivalent à travers l'exemple du CH ₄ (reproduit de (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022)).	24
Figure 2-4 : Représentation schématique de la méthode de comptabilisation du carbone biogénique selon les lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de GES (reproduit de Levasseur & Brandão, 2013).	25
Figure 2-5 : Arbre de processus et frontières du système de la porte à la porte, du berceau à la porte et du berceau au tombeau (reproduit du ILCD Handbook (2010)).	32
Figure 2-6 : Types de DEP en ce qui concerne les étapes du cycle de vie couvertes et les étapes et modules du cycle de vie pour l'évaluation des travaux de construction (reproduit à partir de la norme EN 15804+A2 (2019)).	33
Figure 2-7: Illustration des différentes approches pour traiter la multifonctionnalité en ACV (reproduit de (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022)).	35
Figure 2-8: Illustrations de l'expansion des frontières du système par approche soustractive (= substitution) en haut ou approche additive en bas.	36
Figure 2-9: Illustration des principales approches pour traiter la multifonctionnalité liée aux sous-produits entrants (ici un résidu) ou sortants (reproduit de (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022)).	38
Figure 2-10: Quatre types de chaînes de traçabilité. (reproduit de (Ellen Mc Arthur Foundation, n.d.)).	40
Figure 2-11: Effet de la prise en compte de l'aspect temporel des émissions cycle de vie (reproduit de Ventura (2023)).	44
Figure 2-12: Méthodes tonne.annee (reproduit de Brandão et al., 2019).	47
Figure 2-13: Inconsistance des horizons temps considérés pour les changements climatiques avec l'exemple d'un bâtiment ayant une durée de vie de 75 ans (reproduit de Levasseur, Lesage, Margni, et al. (2010)).	49
Figure 2-14 : Chaînes de cause à effet des LULUC en ACV (reproduit de (Rosenbaum et al., 2017)).	52
Figure 2-15 : Principaux GES absorbés et émis par les terres utilisées et transformées par l'homme (reproduit de (Eggleston et al., 2019)).	53
Figure 2-16 Cycle du carbone généralisé de l'écosystème AFOLU montrant les flux de carbone entrants et sortants du système et entre les cinq compartiments de carbone (reproduit de Eggleston et al. (2019)).	55
Figure 2-17 : Illustration de l'allocation temporelle des impacts des LUC selon un amortissement uniforme ou linéaire dégressif (reproduit de (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022)).	56

Figure 2-18 : Calcul des facteurs de caractérisation (FC) et impacts de l'usage et la transformation des terres pour un problème environnemental Q. (reproduit de (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022)).	57
Figure 4-1 : Schéma représentant les trois systèmes à l'étude (reproduit depuis Carcassi et al. (2022)).	64
Figure 4-2 : Système de produit général comportant les principales étapes du cycle de vie du bâtiment.	64
Figure 4-3 : Approche FC=0/0 - Comparaison des scénarios Béton, Bois et Bambou pour l'impact sur les changements climatiques.	69
Figure 4-4 : Approche FC=0/0 - Analyse de contribution par étape du cycle de vie.	69
Figure 4-5 : Approche FC=0/0 - Analyse de contribution par sous-indicateur.	70
Figure 4-6 : Comparaison des approches FC=0/0 et FC=-1/+1 - Comparaison des scénarios Béton, Bois et Bambou pour l'impact sur les changements climatiques.	71
Figure 4-7 : Approche FC=-1/+1 - Analyse de contribution par étape du cycle de vie.	72
Figure 4-8 : Approche FC=-1/+1 - Analyse de contribution par sous-indicateur.	73
Figure 4-9 : Approche FC=-1/+1 – <i>Carbon dioxide, in air</i> (séquestration) (à gauche) et <i>Carbon dioxide, biogenic</i> (émission) (à droite) - Analyse de contribution par étape du cycle de vie, valeurs normalisées à 100% du total.	75
Figure 4-10 : Arbre des processus détaillé pour le scénario Bois, mettant en avant les enjeux de multifonctionnalité et de stockage permanent de carbone biogénique.	77
Figure 4-11 : Flux de carbone biogénique dans le marché de traitement de fin de vie du bois français pour 1kg de déchet de bois traité (valeurs données en kilogramme de carbone biogénique)	78
Figure 4-12 : Exemple numérique d'une allocation économique dont le bilan de masse de carbone biogénique a été corrigé.	80
Figure 4-13 : Schéma représentatif du processus <i>sawing, hardwood {Europe without Switzerland}</i> non alloué (partiellement reproduit de la documentation du processus (ecoinvent, n.d.-a)).	81
Figure 4-14 : Schéma représentatif du processus <i>sawing, hardwood {Europe without Switzerland}</i> alloué par rapport au bois scié (<i>sawnwood</i>)	82
Figure 4-15 : Schéma représentatif du processus <i>sawing, hardwood {Europe without Switzerland}</i> alloué par rapport à l'écorce (<i>bark</i>)	83
Figure 4-16 : Analyse de contribution de l'impact de la production d'électricité à partir de biogaz issu de digestion de déchets organiques.	85
Figure 4-17: Comparaison de résultats avec la méthode du ILCD Handbook.	88
Figure 4-18: Comparaison de résultats avec la méthode GWPbio.	91
Figure 4-19: Résultats avec la méthode Levasseur (outil dynCO ₂) pour le scénario Bambou. Impact instantané (W.m ²).	93
Figure 4-20: : Résultats avec la méthode Levasseur (outil dynCO ₂) pour les trois scénarios. Impact instantané (W.m ²).	93

Figure 4-21: Résultats avec la méthode Levasseur (outil dynCO ₂) pour les trois scénarios. Impact instantané cumulé (W.m ²).....	94
Figure 4-22 : Description du processus modélisant l'impact sur les changements climatiques liés aux LULUCs (traduite et adaptée de Reinhard et al. (2017) en utilisant le vocabulaire défini dans ce document).	96
Figure 4-23 : Exemple de modélisation de l'impact sur les changements climatiques du processus de production de fèves de soya (reproduit de Reinhard et al. (2017)).....	96
Figure 4-24 : Modélisation de la transformation de terres pour la production d'un kilogramme de fruit de palmier.	98
Figure 4-25 : Comparaison des scénarios pour la production de palme en Indonésie (GWP100).	100

Liste des encadrés

Encadré 1 : La photosynthèse.....	18
Encadré 2 : Le N ₂ O biogénique	19
Encadré 3 : Impacts sur l'acidification marine	20
Encadré 4 : Émissions de GES à haute altitude	29
Encadré 5 : Allocation carbone dans la base de données ecoinvent.....	84
Encadré 6 : Flux d'occupation et de transformations des terres dans <i>ecoinvent</i>	97

Liste des abréviations et acronymes

Acronymes en français		Acronymes en anglais	
ACV	Analyse du Cycle de Vie	LCA	Life Cycle Assessment
AFOLU	Agriculture, Foresterie et Autres Usages des Terres	AFOLU	Agroforestry, Forestry and Other Land Use
CRI	Courbe de Réponse Impulsionnelle	IRF	Impulse Response Function
DEP	Déclaration environnementale de produit	EPD	Environmental Product Declaration
EICV	Évaluation des Impacts du Cycle de Vie	LCIA	Life Cycle Impact Assessment
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture	FAO	Food and Agriculture Organization of the United States
GES	Gaz à effet de serre	GHG	Green house gas
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat	IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ICV	Inventaire du Cycle de Vie	LCI	Life Cycle Inventory
LULUC	Usage et transformation des terres	LULUC	Land Use and Land Use Change
NPP	Production Primaire Nette	NPP	Net Primary Productivity
RCP	Règles de Catégorie de Produit	PCR	Product Category Rule
PRG	Potentiel de Réchauffement Global	GWP	Global Warming Potential
PTG	Potentiel de Température Global	GTP	Global Temperature Change Potential
RSPO	Table ronde sur l'huile de palme durable	RSPO	Roundtable on Sustainable Palm Oil
		WFLDB	World Food Database

1. Contexte et objectif de l'étude

1.1 Contexte

En Analyse du Cycle de Vie (ACV), la comptabilisation du carbone biogénique est très discutée, mais peu harmonisée. Des approches différentes, voire contradictoires, sont recensées dans les guides, normes et réglementations en vigueur pour les différents secteurs de l'économie (biocarburant, plastiques biosourcés, construction, etc.). Les sujets touchant cet enjeu incluent la méthode de comptabilisation des absorptions et émissions de carbone biogénique (neutralité carbone, approche -1/+1), le suivi des flux de carbone au sein du système de produit et entre plusieurs systèmes de produits, la prise en compte des flux de carbone biogénique provenant de l'usage et la transformation des terres et l'inclusion des aspects dynamiques dans la comptabilisation (notamment le stockage).

1.2 Objectifs

Cette étude vise à :

- Établir l'état de l'art des enjeux méthodologiques identifiés dans la littérature scientifique pour la comptabilisation du carbone biogénique en ACV ;
- Synthétiser les exigences réglementaires et normatives, ainsi que la position de plusieurs parties prenantes et donner un éclairage sur l'évolution de la normalisation en la matière ;
- Aborder les différents enjeux méthodologiques avec un regard plus opérationnel dans une étude de cas ;
- Émettre des recommandations pour les instances normatives, les parties prenantes et les praticiens ACV pour une meilleure compréhension de l'intérêt et des limites de la prise en compte du carbone biogénique ;
- Diffuser les résultats de ces travaux auprès de différentes audiences.

1.3 Contenu de l'étude

Le présent rapport est divisé en quatre grandes parties.

La section 2. État de l'art scientifique dresse le portrait actuel de la prise en compte du carbone biogénique en recherche. Tout d'abord, une définition claire du carbone biogénique est donnée et les flux élémentaires et impacts environnementaux sensibles à la comptabilisation du carbone biogénique en ACV sont identifiés. Les principales approches pour prendre en compte le carbone biogénique en ACV sont décrites et analysées de manière critique pour en faire ressortir les avantages et inconvénients méthodologiques et opérationnels. Enfin, les principaux enjeux de ces approches sont davantage détaillés : la section 2.3.1 décrit les enjeux qui influencent le suivi des flux de carbone (choix des frontières du système, multifonctionnalité et traçabilité (*mass-balance*)) ; la section 2.3.2 porte spécifiquement sur l'approche dynamique, et la section 2.3.2.1 sur les flux biogéniques liés à l'usage et la transformation des terres.

Une synthèse du cadre normatif et opérationnel actuel est disponible dans **la section 3. État de l'art des exigences et pratiques de comptabilisation du carbone biogénique**. Une revue des différentes exigences réglementaires et normatives, du positionnement des acteurs publics et privés, ainsi que l'état de l'art au niveau des différents logiciels et bases de données disponibles en ACV est effectuée. Des tableaux résument le positionnement des parties prenantes par rapport aux enjeux identifiés dans la section 2. Finalement, un éclairage sur l'évolution de la réglementation et des pratiques est donné en

fin de section.

La section 4. Étude de cas montre les enjeux sur un cas pratique : la comparaison de plusieurs matériaux contenant du carbone biogénique pour construire un bâtiment. L'ensemble des enjeux soulevés dans les sections précédentes sont abordés sous un angle opérationnel. Trois des quatre approches de comptabilisation du carbone biogénique sont testées : l'application de l'approche FC=0/0 dans la section 4.2, l'approche FC=-1/+1 dans la section 4.3 et les approches dynamiques dans la section 4.4. Les résultats obtenus avec les différentes approches sont comparés. Une analyse des flux de carbone biogénique issus de l'usage et de la transformation des terres est proposée dans la section 4.5.

Finalement, des recommandations sont données dans **la section 5. Conclusions et recommandations**. Ces recommandations sont données au niveau du praticien et des outils (logiciels et bases de données) pour une meilleure prise en compte du carbone biogénique en ACV à plusieurs niveaux.

Ce rapport s'appuie notamment sur deux précédentes études réalisées par ScoreLCA : l'étude n°2021-01 - Analyse du cycle de vie de la biomasse énergie : état de l'art, enjeux méthodologiques et recommandations (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022) et l'étude n°2013-02 - État de l'art sur le stockage/déstockage du carbone par la biomasse au sein des ACV (Levasseur & Brandão, 2013)

2. État de l'art scientifique

Cette section du rapport détaille l'état de l'art scientifique des enjeux méthodologiques autour du carbone biogénique. Après avoir établi le contexte et défini les termes employés, les principales approches de comptabilisation du carbone biogénique sont décrites, puis les enjeux méthodologiques de la prise en compte du carbone biogénique en ACV sont détaillés.

2.1 Contexte et définition des termes

2.1.1 Introduction : le cycle du carbone

Le carbone est présent dans différents compartiments du système terrestre. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) distingue quatre réservoirs naturels de carbone : l'atmosphère, les océans, la biosphère et la lithosphère. Le carbone est stocké et circule entre ces réservoirs sous différentes formes (CO₂, CH₄, carbone contenu dans la biomasse, carbone dissous dans l'océan sous forme de carbonate et bicarbonate...), et à différentes échelles de temps. Les échanges naturels les plus importants sont ceux ayant lieu entre l'atmosphère et la biosphère (par exemple, capture de CO₂ par photosynthèse pendant la croissance des plantes, émissions de carbone pendant la combustion ou la dégradation de matière organique...) et ceux entre l'atmosphère et les océans (par exemple, dissolution du carbone de l'atmosphère dans l'eau et mécanismes de transport de ce carbone entre les différentes couches de l'océan). L'ensemble de ces échanges constituent le cycle naturel du carbone (Costa et al., 2023; Levasseur & Brandão, 2013).

Au sein de ce cycle naturel, on distingue :

- Le **cycle court**, dont les mécanismes ont lieu pendant une période allant de quelques minutes à quelques décennies.

Exemple : des mécanismes comme la photosynthèse, la respiration du sol, les échanges entre l'atmosphère et la couche supérieure de l'océan font partie du cycle court du carbone.

- Le **cycle long**, dont les mécanismes s'étendent sur une échelle temporelle allant d'un siècle à plusieurs millénaires.

Exemple : les mécanismes comme la formation des combustibles fossiles, le changement de la capacité tampon des océans, la ventilation des océans, les changements du pergélisol ou encore la formation et la décomposition de la tourbe sont des mécanismes appartenant au cycle long du carbone. Cliquez ou appuyez ici pour entrer du texte.

Ce cycle naturel est particulièrement perturbé par les activités humaines : dans son dernier rapport, le GIEC estime que les concentrations moyennes mondiales de CO₂, CH₄ et N₂O en 2019 correspondent à des augmentations d'environ 47 %, 156 % et 23 %, respectivement, par rapport au niveau de 1750 (représentatifs de l'ère préindustrielle), et cette augmentation de concentration est sans équivoque d'origine anthropique (Costa et al., 2023). Les deux principales origines de ces émissions sont la combustion de combustibles fossiles (81% à 91%), et les émissions provenant des activités humaines liées à l'usage et à la transformation des terres : déforestation, dégradation de la biomasse, drainage des tourbières...

Lorsqu'il est émis et se trouve dans l'atmosphère, le carbone y est stocké sous la forme de gaz : CO, CO₂, CH₄, des GES qui contribuent au réchauffement climatique. L'évolution du climat est donc intimement liée au cycle du carbone. De plus, l'augmentation de la température a, en retour, une influence sur les flux de carbone entre les réservoirs. Le cycle du carbone dépend donc, réciproquement, de l'évolution du climat. On parle alors de « **système carbone-climat** » pour désigner

l'ensemble des rétroactions entre le cycle du carbone et l'évolution du climat. Les différents réservoirs, leurs interactions et les liens avec l'évolution du climat sont illustrés dans la Figure 2-1. Le schéma est construit autour du CO₂, mais certains de ces processus influencent d'autres GES.

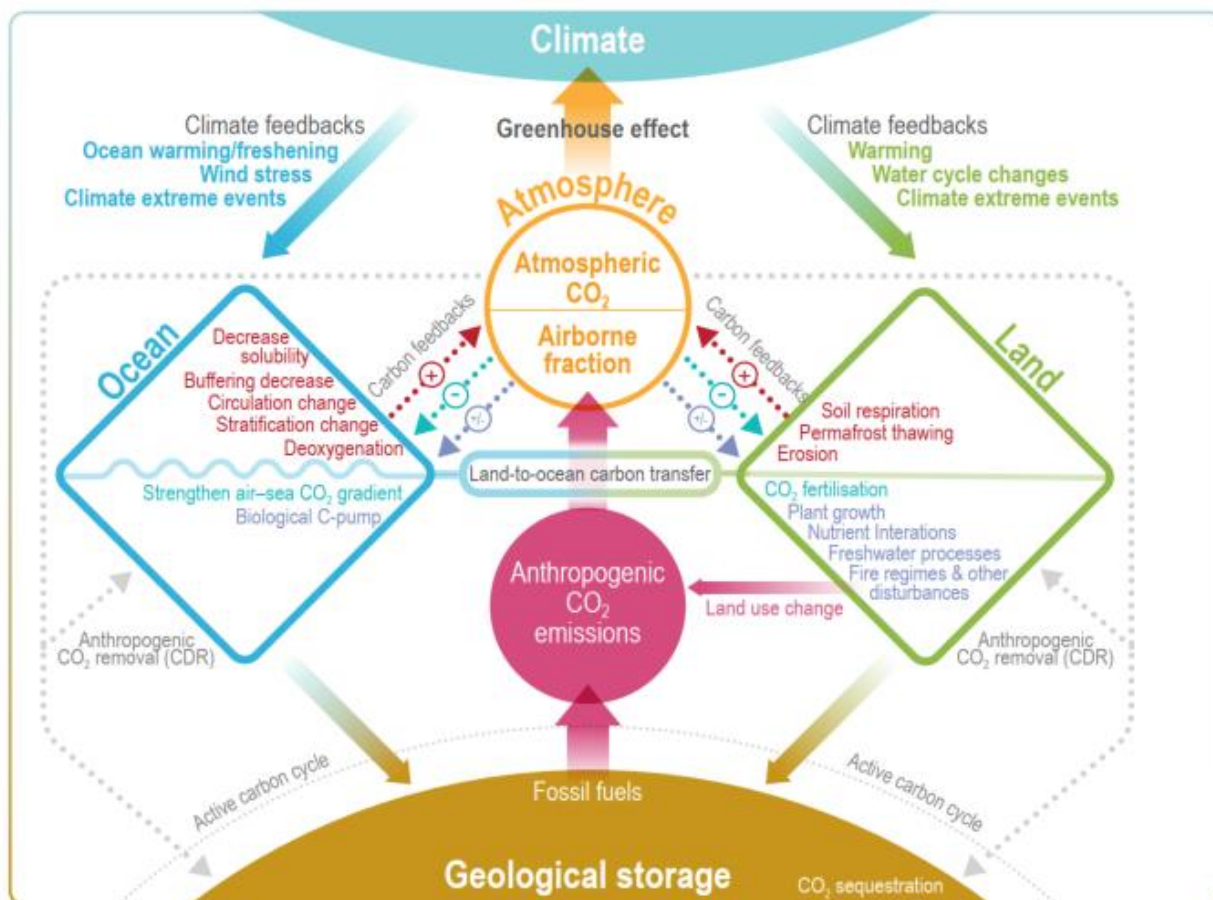


Figure 2-1 : Réservoirs, processus et mécanismes clés qui déterminent les concentrations historiques et futures de CO₂ et les rétroactions entre le carbone et le climat dans le système terrestre (reproduit de Canadell et al., 2023)).

Le schéma ci-dessus présente les interactions entre le climat et le cycle du carbone. Les quatre réservoirs sont représentés : l'atmosphère (orange), les océans (bleu), la biosphère (vert) et la lithosphère (marron). Les flèches turquoise représentent des rétroactions négatives, les flèches rouges des rétroactions positives, les flèches bleues des interactions encore incertaines et les flèches grises l'élimination du CO₂ de l'atmosphère vers les autres réservoirs.

2.1.2 Définition du carbone biogénique

Le terme « carbone biogénique » est utilisé en ACV afin **d'identifier et de caractériser spécifiquement un certain type de carbone**. Le terme désigne en particulier l'atome de carbone, et les molécules qui sont formées avec cet atome sont généralement également qualifiées de « biogénique » par métonymie. Par exemple, on parle de « CO₂ biogénique » pour désigner une molécule de CO₂ qui contient un atome de carbone biogénique.

Plusieurs définitions du carbone biogénique existent dans la littérature. Le carbone biogénique peut être défini :

- Par le mécanisme d'absorption par photosynthèse (PEF (2018), EN 18027 (2023))

Exemple : dans le PEF (2018), la séquestration de CO₂ biogéniques est définie par « l'absorption de CO₂ de l'atmosphère au travers du mécanisme de photosynthèse pendant la croissance de la biomasse ».

- Par son stockage dans le réservoir biosphère (ISO 14067 (2018), PAS 2050 (2011), ISO 21930 (2017)...).

Exemple : dans la norme ISO 14067 (2018), le carbone biogénique est défini comme « carbone dérivé de la biomasse », avec le terme biomasse défini comme « matériau d'origine biologique incluant la matière organique vivante ou morte (arbres, cultures, herbes, algues, animaux, fumier...) excluant la matière intégrée dans des formations géologiques et la matière fossilisée ».

- En contradiction avec le carbone fossile : dans ce cas, le carbone biogénique est aussi qualifié de « carbone non-fossile » (GHG Protocol (2011))

Exemple : le GHG Protocol (2011) ne donne pas une définition précise du carbone biogénique mais décrit le carbone non biogénique comme fossile.

L'ensemble de ces notions se recoupent et sont plus ou moins explicitement mentionnées en fonction du document consulté. Finalement, la définition du carbone biogénique repose sur **deux notions importantes pour être complète** :

- **Le mécanisme d'absorption du carbone de l'atmosphère** : l'atome de carbone doit être absorbé de l'atmosphère par la biomasse grâce au processus de la photosynthèse (voir **Encadré 1**)

Exemple de carbone non biogénique : les dispositifs de capture directe de CO₂ (Direct Air Capture, DAC) permettent d'absorber du carbone de l'atmosphère en un temps court, mais pas au travers de la photosynthèse. Ce carbone n'est donc pas considéré comme biogénique. Pour la même raison, le flux de CO₂ absorbé de l'atmosphère par carbonatation (formation de carbonates par réaction avec le CO₂, notamment pour les matériaux comme la chaux et le ciment) n'est pas un flux de CO₂ biogénique.

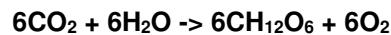
- **Le temps requis pour l'absorption du carbone de l'atmosphère** : l'absorption de carbone de l'atmosphère doit se faire sur un cycle de temps court, contrairement au carbone fossile (voir section 2.1.1).

Exemple de carbone non biogénique : la tourbe est une matière organique formée par accumulation de matière organique morte sur une période de l'ordre de plusieurs milliers d'années. Bien que le carbone soit absorbé par photosynthèse dans les végétaux qui composent la tourbe, il n'est pas considéré comme biogénique, car le mécanisme de formation de la tourbe appartient au cycle long du carbone (Costa et al., 2023).

Ainsi, le terme biogénique est uniquement relatif au mécanisme d'absorption de l'atome de carbone de l'atmosphère vers la biosphère. Il convient de rappeler que **l'atome de carbone biogénique est identique à l'atome de carbone fossile**. Ainsi, **que l'émission de GES soit d'origine fossile ou biogénique, l'effet sur le forçage radiatif est exactement le même** (Cherubini et al., 2012; Levasseur & Brandão, 2013).

Encadré 1 : La photosynthèse

La photosynthèse est le mécanisme qui permet aux végétaux et à certaines bactéries de produire de la matière organique à partir de l'énergie lumineuse du soleil. La biomasse absorbe le dioxyde de carbone (CO₂) de l'air et rejette du dioxygène. La photosynthèse est une réaction chimique et se caractérise par l'équation suivante (Encyclopédie Larousse, n.d.):



2.1.3 Le carbone biogénique en ACV : niveau inventaire

En ACV, on distingue généralement trois catégories de flux élémentaires pouvant contenir du carbone biogénique (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022).

- Les **flux de CO₂ captés lors de la photosynthèse**, phénomène également désigné par la séquestration de carbone. Ce flux est généralement calculé à partir du contenu carbone du produit, en supposant que l'ensemble de carbone contenu dans le produit a été absorbé par photosynthèse. Le CO₂ capté lors de la croissance de la biomasse et éventuellement stocké par la suite dans les sols est comptabilisé comme un flux de carbone biogénique provoqué par des changements d'utilisation des terres (voir ci-dessous).
- Les **flux de carbone biogénique (CO₂, CH₄ ou CO) issus du contenu carbone de la biomasse**, généralement émis à l'atmosphère au cours des étapes de combustion et dégradation de la biomasse (compostage, enfouissement, etc.) de la biomasse.
- Les **flux de carbone biogénique (CO₂, CH₄ ou CO) provoqués par l'usage et la transformation des terres (en anglais, « land use land use change (LULUC) »)**. Ces flux sont liés à l'impact des activités humaines nécessitant d'occuper et/ou de transformer un territoire pour une activité. Ces flux et les impacts liés à ceux-ci font l'objet d'une section spécifique dans ce rapport (section 2.3.2.1) et ne seront pas détaillés davantage dans la présente section.



Encadré 2 : Le N₂O biogénique

Le protoxyde d'azote, aussi appelé oxyde nitreux, de formule chimique N₂O est un GES puissant : 1kg de N₂O a un potentiel de réchauffement global (PRG) pour un horizon de 100 ans de 273 (Forster et al., 2023b). La formation de ce gaz est due à plusieurs activités telles que la production de fertilisants, la combustion de la biomasse, le traitement des eaux usées... mais est en majorité due aux interactions entre les fertilisants et la matière organique du sol. Bien qu'il ne contienne pas de carbone, ce gaz est parfois qualifié de biogénique en raison de la similitude des interactions mettant en jeu le N₂O et le carbone biogénique (c'est par exemple le cas dans le GHG Protocol (2011)). Cependant, aucun mécanisme ne permet de réabsorber le N₂O de l'atmosphère sous cette forme afin de diminuer les effets sur les changements climatiques. Pour cette raison, le N₂O n'a qu'un facteur de caractérisation fossile et n'est pas traité différemment en ACV selon qu'il soit qualifié de biogénique ou de fossile.¹



2.1.4 Le carbone biogénique en ACV : niveau impact

Les flux de GES, qu'ils soient d'origine fossile ou biogénique, exercent une **influence identique sur l'évolution du climat**. Ainsi, les flux d'inventaires listés ci-dessus **contribuent à l'impact sur les changements climatiques**. Ils contribuent également à **l'impact sur l'acidification marine** (voir Encadré 3). Plus spécifiquement, les flux d'inventaire de GES issus des LULUC **sont caractérisés pour l'impact sur les changements climatiques et l'acidification marine, mais ne contribuent pas aux catégories d'impact au niveau problème portant sur l'occupation et l'utilisation des terres** (voir section 2.3.2.1 et Encadré 6 pour plus de détail).

¹ Pour plus d'information sur le N₂O biogénique, voir l'article de Tian et al., 2012.



Encadré 3 : Impacts sur l'acidification marine

L'acidification marine est la catégorie d'impact qui quantifie la diminution du pH des océans. Ce phénomène est une autre conséquence environnementale de l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère : le CO₂ se dissout dans l'eau pour former de l'acide carbonique, qui contribue à faire chuter le pH de l'eau. La quantité de carbone dissoute dans l'eau est à l'équilibre avec la concentration de carbone dans l'atmosphère (équation de solubilité). Ainsi, l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère est corrélée avec la quantité de carbone dissoute dans l'eau. Par exemple, dans la méthode de caractérisation d'impact IMPACT World +, le facteur de sort utilisé pour quantifier l'impact sur l'acidification marine est le même que celui utilisé pour la catégorie Changements Climatiques, c'est pourquoi les flux de GES biogéniques ont des facteurs de caractérisation proportionnels pour les deux catégories d'impact. Les enjeux de la prise en compte du carbone biogénique touchent donc tout autant la catégorie d'impact Changements Climatiques et la catégorie d'impact Acidification Marine. Cependant, par souci de simplification, seul l'impact sur les Changements Climatiques sera mentionné par la suite.



2.1.4.1 Bilan radiatif et changements climatiques

L'évolution du climat est intimement liée au bilan radiatif de la Terre. Le **bilan radiatif** est la différence entre l'énergie incidente du soleil et celle qui est émise par la Terre. À l'équilibre, le bilan radiatif est nul. S'il est positif, cela signifie que la température globale augmente. On parle de **forçage radiatif** lorsque le bilan radiatif n'est pas à l'équilibre. Deux grands mécanismes gouvernent le bilan radiatif :

- **l'albédo** est la fraction de la lumière visible du soleil qui est directement réfléchi par la terre, comme un miroir. Les surfaces blanches contribuent particulièrement à réfléchir la lumière (glaciers, neige, nuages). L'albédo contribue **négativement** au bilan radiatif de la planète (il le **diminue**) ;
- **l'effet de serre** : le rayonnement visible du soleil qui traverse l'atmosphère, transparente pour les longueurs d'onde visibles, est absorbé par la Terre, qui réémet ce rayonnement sous forme de rayonnement infrarouge. L'effet de serre est la capacité de l'atmosphère à absorber ce rayonnement infrarouge et à le retransmettre vers la terre, plutôt que de le laisser la traverser. Autrement dit, l'atmosphère agit comme les vitres d'une serre en piégeant la chaleur autour de la surface terrestre. L'effet de serre est dû à la présence de certains gaz dans l'atmosphère : vapeur d'eau, dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), oxyde nitreux...) appelés gaz à effet de serre (GES). L'effet de serre contribue **positivement** au bilan radiatif de la planète (il **l'augmente**) (Forster et al., 2023a).

2.1.4.2 Chaîne de cause à effet de l'impact sur les changements climatiques

Aujourd'hui, en ACV, seul **l'effet de serre** est pris en compte dans les méthodes de caractérisation, mais **pas l'albédo**. Le GIEC estime que l'albédo contribue à faire diminuer le forçage radiatif d'origine

anthropique de 4% au niveau global (Smith, 2023). Cependant, cette valeur pourrait considérablement varier à l'échelle d'une ACV et affecter la prise de décision.

Lorsqu'un GES est émis à l'atmosphère, la concentration atmosphérique de ce gaz augmente. L'augmentation de la concentration des GES dans l'atmosphère entraîne une augmentation du forçage radiatif (voir section ci-dessus), et donc des températures à l'échelle globale. La catégorie d'impact au niveau problème Changements climatiques quantifie donc l'influence des émissions anthropiques de GES sur le réchauffement climatique. Le réchauffement de la planète entraîne ensuite des conséquences ultérieures dans la chaîne de cause à effet : augmentation du niveau de la mer, fonte des glaces, migration des espèces, augmentation des maladies, etc. Ainsi, l'évolution du climat influence à son tour les aires de protection (AdP) au niveau dommage (Qualité des écosystèmes et Santé humaine). La Figure 2-2 illustre la chaîne de cause à effet pour la quantification de l'impact sur les changements climatiques, depuis l'émission (au niveau inventaire) jusqu'aux impacts sur les aires de protection (impact au niveau dommage).

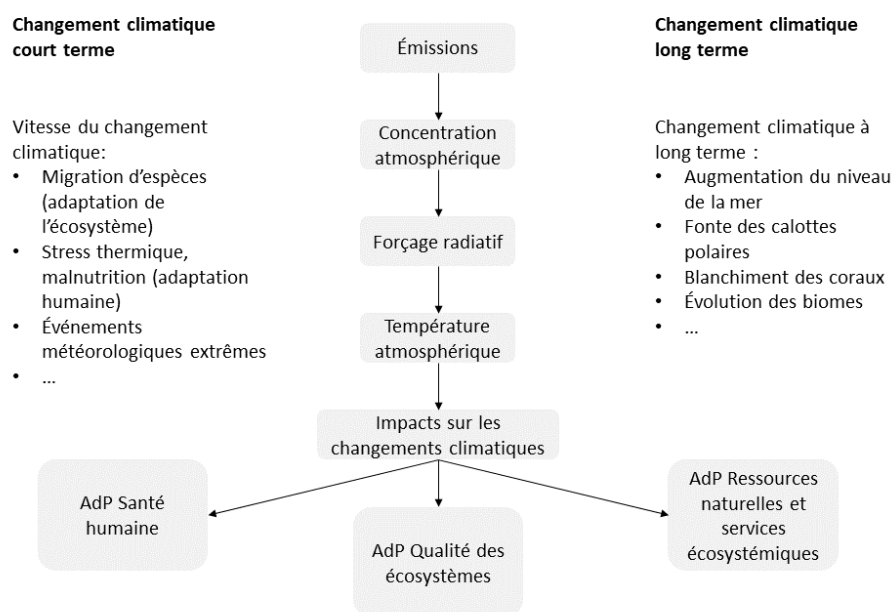


Figure 2-2 : Chaîne de cause à effet du changement climatique liée à l'émission de gaz à effet de serre (reproduit de Levasseur et al., 2017).

Les enjeux autour de la prise en compte du carbone biogénique touchent la chaîne de cause à effet depuis la prise en compte du carbone biogénique dans l'inventaire, jusqu'à sa caractérisation en impact sur les Changements Climatiques (au niveau problème). Le reste de la chaîne de cause à effet, entre les impacts du niveau problème et les aires de protection, n'est pas influencé par ces enjeux. Les sections suivantes détaillent donc le calcul permettant de passer de l'inventaire à la catégorie d'impact au niveau problème : Changements Climatiques.

2.1.4.3 Évolution des émissions de GES biogéniques dans l'atmosphère

L'effet d'une émission de gaz sur les changements climatiques dépend de trois facteurs (US EPA, 2024):

- la **quantité de gaz émise dans l'atmosphère** ;
- le **temps de résidence du gaz dans l'atmosphère** : une fois émise dans l'atmosphère, la quantité de chaque gaz évolue dans le temps. Un gaz peut rester dans l'atmosphère pendant une période allant de quelques mois à des milliers d'années. Le gaz peut disparaître de l'atmosphère par différents moyens :
 - un **phénomène physique** ;
Exemple : la pluie retire de la vapeur d'eau de l'atmosphère (condensation) ;
 - une **réaction chimique au sein de l'atmosphère** ;
Exemple : le méthane réagit avec les hydroxyles OH pour former du CO₂ ;
 - une **réaction physique, photochimique ou chimique entre l'atmosphère et un autre réservoir** ;
Exemple : le CO₂ est transféré de l'atmosphère vers les autres réservoirs, par exemple par photosynthèse (réaction photochimique, transfert vers le réservoir biosphère) ou par dissolution dans l'océan (réaction physique, transfert vers le réservoir océan) ;
 - à la suite d'un **phénomène radiatif** ;
Exemple : à haute altitude, le rayonnement du soleil est tel qu'il « casse » les molécules d'halocarbures, un autre GES.

Le temps de demi-vie (c.-à-d. temps nécessaire pour que la moitié de la quantité émise disparaisse de l'atmosphère) est souvent donné comme une estimation du temps de résidence du gaz dans l'atmosphère.

La concentration des gaz à effet de serre ayant une durée de vie longue (CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, CFCs, et autres halocarbures) s'uniformise dans l'atmosphère, car les molécules de gaz ont le temps de se diffuser. Ainsi, l'impact sur les changements climatiques ne dépend pas du lieu d'émission. Cependant, cela n'est pas le cas pour les gaz ayant une durée de vie courte (oxydes d'azote (NO_x), monoxyde de carbone (CO), composés organiques volatils, carbone noir, carbone organique, oxydes de soufre (SO_x)...) dont l'effet sur le climat présente de fortes hétérogénéités spatiales et temporelles, avec des dynamiques d'impact régionales variables qui dépendent de la région d'émission. Leur contribution au taux d'augmentation de la température peut être importante sur le court terme, mais pas sur le long terme. Actuellement, bien que leur prise en compte soit recommandée par la Life Cycle Initiative en analyse de sensibilité avec le GWP20, les forceurs radiatifs à courte durée de vie ne sont généralement pas considérés en ACV (Levasseur et al., 2017).

- le **pouvoir réchauffant intrinsèque du gaz, ou efficacité radiative**, qui correspond au forçage radiatif instantané du gaz, c'est-à-dire à la capacité de chaque gaz à contribuer à l'effet de serre. Cette propriété dépend de la structure moléculaire même du gaz.

Le Tableau 2-1 donne les caractéristiques principales des trois gaz considérés dans cette étude : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le monoxyde de carbone (CO).

Tableau 2-1 : Principaux paramètres influençant le calcul et valeurs des PRG et PTG du CO₂, CH₄ et CO fossiles (Forster et al., 2023b, 2023a)

Gaz à effet de serre	CO ₂	CH ₄ *	CO
Type de substance	Gaz à effet de serre	Gaz à effet de serre	Forceur radiatif à courte durée de vie
Évolution de la quantité de GES après émission	Modélisée par le modèle du cycle du carbone-climat de Bern (Joos et al., 2013)	Modélisée par une courbe IRF (<i>Impulse Response Function</i>) Cinétique d'ordre 1	Modélisée par une courbe IRF (impulse response function) Cinétique d'ordre 1
Temps de résidence dans l'atmosphère (temps de demi-vie)	Multiple	11.8 ans	1 à 2 mois
Mécanisme d'épuration	Réabsorption par les autres réservoirs	Réaction chimique (oxydation en O ₃ , H ₂ O et CO ₂)	Réaction chimique (oxydation en CO ₂ et ozone)
Efficacité radiative [W m ⁻² ppb ⁻¹]	1,33 × 10 ⁻⁵	5,7 × 10 ⁻⁴	X
GWP20	1	82,5	X
GWP100	1	29,8	X
GWP500	1	10,0	X
GTP100	1	7,5	X

* les facteurs donnés pour le méthane incluent l'oxydation du méthane en CO₂.

X : non fourni par le GIEC (Smith, 2023).

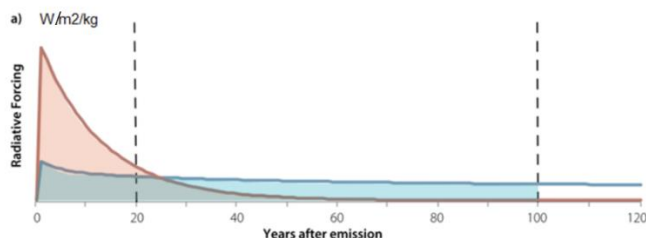
2.1.4.4 Calcul de l'impact sur les changements climatiques

L'impact sur les changements climatiques peut être quantifié en utilisant différentes métriques. Les deux indicateurs les plus utilisés en ACV, et recommandés par l'UNEP Life Cycle Initiative (Levasseur et al., 2017) sont :

- le **Potentiel de Réchauffement Global (PRG) ou Global Warming Potential (GWP)**, qui mesure le forçage radiatif cumulé sur une période définie causé par une émission. Généralement, il est exprimé pour une période de 100 ans et noté PRG100 (GWP100). Il s'agit d'un indicateur qui intègre les impacts dans le temps, c'est-à-dire qu'il mesure les impacts **pendant une durée de temps et non à un moment précis**. Cet indicateur est recommandé pour exprimer les impacts à court terme sur les changements climatiques ;
- le **Potentiel de Température Global (PTG) ou Global Temperature Change Potential (GTP)**, qui mesure le changement potentiel de température global à un moment défini causé par une émission. Généralement, il est exprimé pour une période de 100 ans et noté PTG100 (GTP100). Il s'agit d'un indicateur instantané, c'est-à-dire qu'il mesure les **impacts à un moment précis**. Cet indicateur est recommandé pour exprimer les impacts à long terme sur les changements climatiques, car ses valeurs sont similaires à un PRG calculé avec un horizon temporel de plusieurs siècles.

La Figure 2-3 résume le calcul des deux indicateurs. Le CO₂ est le gaz de référence pour les deux indicateurs, c'est-à-dire que les impacts sont exprimés **par rapport à l'impact potentiel d'une émission de CO₂**. Les deux indicateurs sont donc exprimés dans la même unité (kilogramme de CO₂ équivalent), mais **traduisent des phénomènes physiques différents et sont calculés différemment. Ils ne peuvent pas s'additionner.**

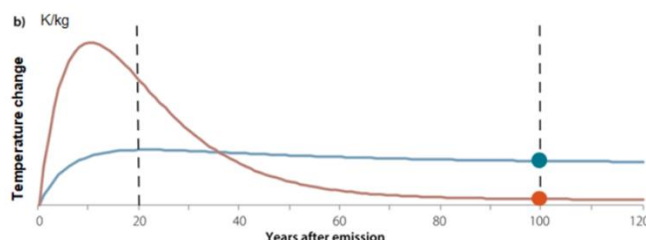
GWP100 mesure le changement potentiel de forçage radiatif sur une durée de 100 ans
= indicateur des impacts à court terme sur les changements climatiques



AGWP → Intégration des impacts sur l'horizon de temps de l'impact choisi

$$GWP_{CH_4} = \frac{AGWP_{CH_4} \text{ [W/m2.an/kg}_{CH_4}]}{AGWP_{CO_2} \text{ [W/m2.an/kg}_{CO_2}]}$$

[kgCO₂ eq (court) /kgCH₄]



GTP mesure le changement potentiel de la température mondiale dans 100 ans
= indicateur des impacts à long terme sur les changements climatiques

AGTP → Impact instantané à l'horizon de temps de l'impact choisi

Le GWP et le GTP ne peuvent pas s'additionner.

$$GTP_{CH_4} = \frac{AGTP_{CH_4} \text{ [K/kg}_{CH_4}]}{AGTP_{CO_2} \text{ [K/kg}_{CO_2}]}$$

[kgCO₂ eq (long) /kgCH₄]

Figure 2-3 : Principes de calcul des indicateurs GWP100 et GTP100 en CO₂ équivalent à travers l'exemple du CH₄ (reproduit de (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022)).

La Figure 2-3 a) montre la variation du forçage radiatif résultant de l'émission d'un kilogramme de méthane (courbe rouge) et d'un kilogramme de CO₂ (courbe bleue) à l'année 0 en fonction du temps. Le PRG absolu, aussi noté AGWP, représente l'intégrale (l'aire sous la courbe) du forçage radiatif sur l'horizon de temps choisi (dans cet exemple, 100 ans). Le GWP100 du CH₄ est calculé en faisant le ratio de l'AGWP100 du CH₄ (aire rouge, placé au numérateur) et de l'AGWP100 du CO₂ (aire bleue, placé au dénominateur).

La Figure 2-3 b) montre la variation de la température résultant de l'émission d'un kilogramme de méthane (courbe rouge) et d'un kilogramme de CO₂ (courbe bleue) à l'année 0 en fonction du temps. Le PTG absolu, aussi noté AGTP, est la valeur de la température à l'horizon de temps choisi (dans cet exemple, 100 ans). Le GTP100 du CH₄ est calculé en faisant le ratio de l'AGTP100 du CH₄ (point rouge, placé au numérateur) et de l'AGTP100 du CO₂ (point bleu, placé au dénominateur).

2.2 Descriptions des principales approches de comptabilisation du carbone biogénique en ACV

2.2.1 Hypothèse de la neutralité carbone

L'hypothèse de neutralité carbone est un argument qui est mis en avant pour calculer l'impact des flux de GES biogénique de manière différente que les autres flux en ACV, et plus spécifiquement différemment des flux de GES fossiles. Elle repose sur l'idée qu'au cours du cycle de vie d'un produit, la quantité de CO₂ absorbée par la biomasse pendant sa croissance sera ultimement relâchée dans l'atmosphère à l'étape de la fin de vie du produit (décomposition ou combustion de la biomasse). Comme l'émission de CO₂ compense la séquestration de CO₂, cela résulte en un impact sur les changements climatiques nul.

L'hypothèse de la neutralité carbone repose donc sur deux postulats.

- **L'égalité au niveau de l'inventaire** des flux de CO₂ biogénique entrant et sortant : on suppose que la quantité de CO₂ absorbée est exactement égale à la quantité de CO₂ réémise dans l'atmosphère au cours des étapes suivantes du cycle de vie.
- **L'égalité des impacts générés et évités sur les changements climatiques** : on suppose que les impacts évités par l'absorption du CO₂ sont compensés par les impacts générés par l'émission du CO₂.

À noter que l'hypothèse de neutralité carbone **ne s'applique pas aux flux de carbone biogéniques provoqués par les LULUC**, car ils sont issus d'un déséquilibre des stocks de carbone provoqués par l'activité humaine qui ne sera pas compensé par ailleurs (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022) (voir section 432.3.3 pour plus de détail sur ces flux).

Historiquement, cette hypothèse découle de l'application hors contexte des lignes directrices pour le calcul des inventaires de GES nationaux (Levasseur & Brandao, 2014; Müller-Wenk & Brandão, 2010). Cette méthode divise les émissions de GES en différents secteurs et est basée sur une approche où on considère un changement net de stock de carbone du réservoir biosphère. Dans ce cadre, l'ensemble des absorptions et émissions de carbone biogénique sont comptabilisées dans le secteur Agriculture, Foresterie et Autres Usages des Terres (AFOLU) : si des arbres sont abattus et que le bois est utilisé dans un autre secteur, le carbone qui est stocké dans des produits (bois) qui quittent le secteur AFOLU est considéré comme une émission directe vers l'atmosphère. Si au cours des étapes subséquentes du cycle de vie, la biomasse est brûlée sous forme de bioénergie, pour éviter le double comptage, le carbone perdu lors de la combustion ne doit pas être comptabilisé à nouveau. Ainsi, les émissions de carbone biogénique dans les autres secteurs, tels que le secteur « Énergies » ou « Déchet », sont considérées comme nulles. Les lignes directrices de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques suivent une logique similaire et considèrent des émissions biogéniques nulles pour éviter un double comptage (Levasseur & Brandao, 2014; Müller-Wenk & Brandão, 2010).

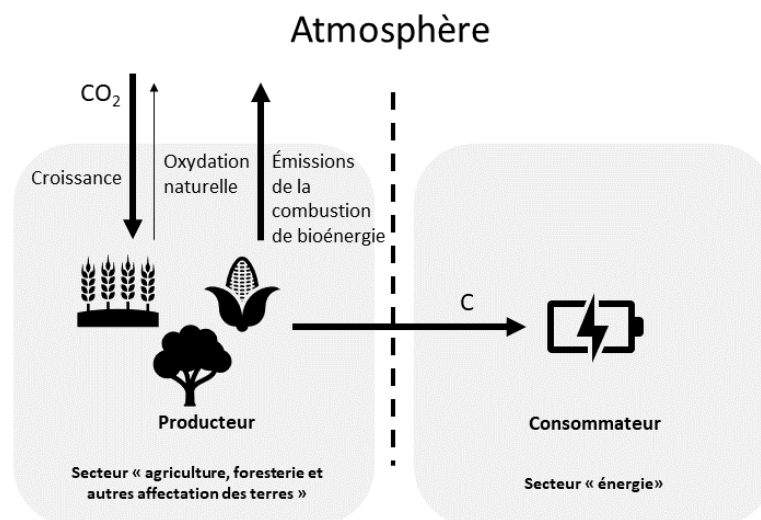


Figure 2-4 : Représentation schématique de la méthode de comptabilisation du carbone biogénique selon les lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de GES (reproduit de Levasseur & Brandão, 2013).

L'hypothèse de neutralité carbone a été beaucoup critiquée par les praticiens sur ces deux postulats (Levasseur et al., 2013; Levasseur & Brandão, 2013; Liu et al., 2018; Müller-Wenk & Brandão, 2010; Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022). En effet :

- l'égalité des flux de CO₂ au niveau de l'inventaire n'est pas vérifiée si
 - le carbone est **absorbé sous forme de CO₂ et relâché dans l'atmosphère sous d'autres formes (CH₄, CO)** ;
 - le carbone est **stocké de manière permanente par le système** (par exemple par enfouissement) ;
- l'égalité des impacts générés et évités sur les changements climatiques n'est pas vraie si on considère **l'aspect dynamique**. Par exemple, l'étude de Pittau et al. (2018) montre que la période de rotation des cultures joue un rôle dans le calcul de l'impact : plus précisément, les produits dérivés du bois (par exemple, le bois transformé en poutres ou en planches) ont une période de rotation plus longue en raison de la lenteur de la croissance des forêts, et ne peuvent donc pas être considérés comme neutres en carbone à court terme. À l'inverse, les matériaux biosourcés à croissance rapide, tels que la paille et le chanvre, ont une période de rotation courte et peuvent avoir un effet d'atténuation efficace sur les émissions de GES en éliminant rapidement le carbone de l'atmosphère (Müller-Wenk & Brandão, 2010).

Malgré ces critiques, en ACV, plusieurs méthodes de comptabilisation biogénique découlent de l'hypothèse de neutralité carbone. Dans les sections suivantes, les **quatre principales approches pour prendre en compte le carbone biogénique sont décrites** (« Inventaire = 0/0 », « FC=0/0 », « FC=-1/+1 » et « Dynamique »). Les deux premières approches sont bâties sur l'hypothèse de neutralité carbone. Chacune de ces méthodes est décrite et leurs avantages et inconvénients, du point de vue méthodologique et opérationnel, sont abordés. Le

Tableau 2-2 présente une synthèse de cette section.

2.2.2 Approche « Inventaire = 0/0 »

L'approche dite « Inventaire = 0/0 » découle directement du principe de neutralité carbone : considérant que le bilan au niveau de l'inventaire et les impacts des flux de CO₂ biogéniques sont toujours nuls à l'échelle du cycle de vie, les flux de CO₂ biogénique **ne sont pas inventoriés, et en conséquence ne sont pas caractérisés**. Les autres flux de GES biogénique sont **inventoriés et caractérisés comme du carbone fossile**.

Au niveau **méthodologique**, cette méthode hérite des problématiques liées à l'hypothèse de neutralité carbone.

- Par rapport à **l'égalité au niveau de l'inventaire** :
 - si le carbone biogénique est absorbé sous forme de CO₂ et **relâché dans l'atmosphère sous d'autres formes (CH₄, CO)**, alors l'impact environnemental final s'en trouve surestimé, car l'absorption du carbone biogénique de l'atmosphère sous forme de CO₂ n'est pas comptabilisée ;
 - ne pas comptabiliser la séquestration est également problématique en cas de **stockage permanent** de carbone (ex., enfouissement), car aucun crédit environnemental n'est accordé à l'absorption de CO₂ de l'atmosphère.
- Par rapport à **l'égalité au niveau de l'impact** : cette approche est une approche **statique** et ne considère pas la dimension temporelle

De plus, d'autres enjeux méthodologiques apparaissent : sans inventaire des flux de carbone biogénique, cette approche **ne permet pas de respecter le bilan de masse des processus** (la quantité de matière entrante n'est pas égale à la quantité de matière sortante).

Au niveau **opérationnel**, cette approche exclut les flux de carbone biogénique de l'inventaire. Elle a le considérable avantage de ne pas comporter d'étape de collecte de données pour les flux de CO₂ biogéniques et est donc très facile à mettre en œuvre, mais **l'inventaire qui en résulte est incomplet et l'impact environnemental calculé est partiel**.

2.2.3 Approche « FC=0/0 »

L'approche dite « FC=0/0 » découle aussi du principe de neutralité carbone. À la différence de l'approche « Inventaire = 0/0 », les flux de CO₂ biogénique **sont inventoriés, mais leur facteur de caractérisation est nul**. Les autres flux de GES biogénique sont inventoriés, et leur **facteur de caractérisation est ajusté pour refléter le bilan de masse du carbone biogénique**. En effet, les facteurs de caractérisation du CH₄ et du CO sont ajustés afin de prendre en compte les impacts évités de la séquestration de CO₂ à l'origine de la molécule de CH₄ et de CO (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022).

Au niveau **méthodologique**, cette méthode résout en partie la première critique de l'hypothèse de neutralité carbone, mais pas la deuxième.

- Égalité au niveau de l'inventaire :
 - **l'ajustement des facteurs de caractérisation** des autres GES biogéniques permet de prendre en compte les impacts évités par la capture du CO₂ si celui-ci est réémis sous la forme d'autre gaz (CH₄, CO).
 - en cas de **stockage permanent**, l'absorption nette de carbone n'est pas comptabilisée et aucun crédit environnemental n'est accordé à l'absorption de CO₂ de l'atmosphère.
- Égalité au niveau de l'impact : cette approche reste une approche **statique** et ne considère pas la dimension temporelle.

Contrairement à l'approche « Inventaire = 0/0 », la comptabilisation des flux de carbone biogéniques au niveau de l'inventaire permet le respect du bilan de masse des processus.

Au niveau **opérationnel**, cette méthode demande donc une collecte de données pour les flux de CO₂ biogéniques, mais permet de faire des analyses de sensibilité avec d'autres méthodes de comptabilisation. En revanche, à l'étape d'interprétation des résultats, **cette méthode ne permet pas de montrer la contribution positive et négative de chaque processus aux impacts sur les changements climatiques**. L'analyse de contribution sera faussée.

2.2.4 Approche « FC = -1 /+1 »

L'approche dite « FC=-1/+1 » n'est pas construite sur le principe de neutralité carbone. Dans cette approche, les flux de CO₂ biogénique **sont inventoriés et caractérisés comme du CO₂ fossile**. Les autres flux de GES biogénique sont **inventoriés et caractérisés comme des GES fossiles**. Cette méthode revient à traiter les flux de carbone biogéniques **comme tous les autres flux en ACV**, en prenant en compte le crédit associé à une absorption de CO₂ de l'atmosphère et l'impact environnemental résultant d'une émission de GES à l'atmosphère.

Au niveau **méthodologique**, cette méthode résout complètement la première critique de l'hypothèse de neutralité carbone, mais pas la deuxième.

- Égalité au niveau de l'inventaire :
 - si le carbone est absorbé sous forme de CO₂ et relâché dans l'atmosphère sous d'autres formes (CH₄, CO), la prise en compte de la séquestration et des émissions avec les facteurs de caractérisation fossiles **permet comptabiliser la différence d'impact** ;
 - en cas de **stockage permanent** de carbone (ex., enfouissement), l'absorption nette de carbone est comptabilisée, car la séquestration de carbone est caractérisée.
- Égalité au niveau de l'impact : cette méthode est aussi une méthode **statique** et ne considère pas la dimension temporelle.

À l'instar de la méthode « FC=0/0 », cette méthode permet de respecter le bilan de masse des processus. En revanche, l'impact environnemental est influencé par les choix ou les potentielles erreurs de modélisation des flux de carbone dans le système de produit. Par exemple :

- si les frontières du système n'incluent pas l'ensemble des étapes d'absorption et d'émissions de GES biogéniques, l'impact environnemental est soit surestimé (s'il manque l'étape de séquestration du carbone), soit sous-estimé, voire négatif (s'il manque l'étape d'émission du carbone) ;
- en cas d'allocation, l'impact d'une partie du système peut ne pas refléter l'absorption de carbone réelle, mais allouée selon d'autres critères (économiques par exemple). Les approches de traitement de déchets sont également un enjeu (*cut-off*, APOS...) ;
- En cas d'intrant ayant un contenu biogénique certifié qui ne correspond pas au contenu en carbone biogénique réel, physique, du produit.

Ces enjeux sont davantage détaillés dans la section 2.3.1 de ce rapport.

Au niveau **opérationnel**, cette méthode demande une collecte de données pour les flux de CO₂ biogéniques et exige de **porter une attention particulière à la modélisation précise des flux de carbone** dans le système étudié au vu des enjeux méthodologiques listés précédemment. L'étude de cas (voir section 4. Étude de cas) permet d'illustrer les enjeux rencontrés par les praticiens pendant leur modélisation. Finalement, cette approche permet de faire des analyses de sensibilité avec d'autres méthodes de comptabilisation et dans le cadre d'une analyse de contribution par processus, permet de visualiser la contribution positive et négative de chaque processus ou étape du cycle de vie aux impacts sur les changements climatiques.

2.2.5 Approche de comptabilisation dynamique

L'approche de comptabilisation dynamique fait l'objet d'une section spécifique (voir section 2.3.2) dans ce rapport. Cette approche **n'est pas exclusive à la comptabilité des flux de carbone biogéniques** (elle peut s'appliquer à tous les flux d'inventaire). Cependant, dans le cas du carbone, et considérant plusieurs aspects clé tels que le stockage ou la dynamique de séquestration, l'approche a été plus appliquée pour les questions liées au carbone biogénique et au changement climatique.

Contrairement aux approches déjà listées, l'approche dynamique est la seule à répondre pleinement aux critiques de l'hypothèse de neutralité carbone puisqu'en plus **d'adopter les facteurs de caractérisation fossiles pour les émissions et absorptions de CO₂ et les émissions de GES biogéniques**, elle vise à justement **prendre en compte l'effet de la temporalité** sur le calcul de l'impact environnemental. Une dimension temporelle est considérée autant au niveau de l'inventaire qu'au niveau des impacts.

Bien que du point de vue **méthodologique** cette approche réponde mieux aux enjeux soulevés

précédemment, plusieurs mises en application de cette approche sont proposées et il n'y a pas de consensus sur l'approche dynamique à utiliser (voir section 2.3.2). Surtout, cette approche a des inconvénients au **niveau opérationnel**, car elle demande un inventaire beaucoup plus complet qui inclue le moment où les émissions ont lieu. De plus, l'approche dynamique n'est pas opérationnalisée dans les logiciels couramment utilisés en ACV (SimaPro, OpenLCA...) ce qui demande au praticien d'utiliser d'autres outils pour la mettre en place : dynCO₂ (Levasseur, Lesage, & Margni, 2010), la méthode TAWP développée par Kendall (2012) ou plus récemment Temporalis (Cardellini et al., 2018), une librairie python compatible avec le logiciel Brightway qui permet de mettre en œuvre cette approche dynamique tant pour l'inventaire que pour la caractérisation des impacts. Étant donné l'effort additionnel et la complexité d'application de ces outils, les praticiens ont tendance à privilégier les approches statiques.

Encadré 4 : Émissions de GES à haute altitude

Les **émissions en haute altitude** ont un impact sur les changements climatiques plus élevés qu'à basse altitude à cause de plusieurs mécanismes. Cet aspect est essentiel à prendre en compte **pour les flux de GES biogéniques et non biogéniques**, particulièrement pour les études ACV sur les bioénergies appliquées au secteur de l'aviation. À notre connaissance, le cadre CORSIA ne prend pas en compte les effets de la régionalisation des FC en haute altitude (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022). Pour plus d'information sur le calcul des impacts des émissions en haute altitude, se référer aux articles de Gaillot et al. (2023), Lee et al. (2021) et Kärcher (2018).

Tableau 2-2: Tableau récapitulatif des approches de comptabilisation du carbone biogénique, et de leurs avantages et inconvénients

	Inventaire = 0/0	FC=0/0	FC=-1/+1	Dynamique
Description	Flux de CO ₂ bio non inventoriés, non caractérisés	Flux de CO ₂ bio inventoriés, caractérisés avec un facteur de caractérisation nul	Flux de CO ₂ bio inventoriés, caractérisés comme fossiles	Flux de CO ₂ bio et chronologie inventoriés, caractérisés comme fossiles
	Autres flux de GES _{bio} inventoriés, caractérisés comme fossiles	Autres flux de GES _{bio} inventoriés, facteur de caractérisation adapté	Autres flux de GES _{bio} inventoriés, caractérisés comme fossiles	Autres flux de GES _{bio} et chronologie inventoriés, caractérisés comme fossiles
Enjeux méthodologiques	<ul style="list-style-type: none"> ● Impact environnemental surestimé si émissions sous formes non-CO₂ (CH₄, CO) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Émissions sous formes non-CO₂ (CH₄, CO) prises en compte par les facteurs de caractérisation ajustés 	<ul style="list-style-type: none"> ● Émissions sous formes non-CO₂ (CH₄, CO) prises en compte par les facteurs de caractérisation fossiles 	<ul style="list-style-type: none"> ● Émissions sous formes non-CO₂ (CH₄, CO) prises en compte par les facteurs de caractérisation fossiles
	<ul style="list-style-type: none"> ● Stockage permanent non comptabilisé 	<ul style="list-style-type: none"> ● Stockage permanent non comptabilisé 	<ul style="list-style-type: none"> ● Stockage permanent comptabilisé 	<ul style="list-style-type: none"> ● Stockage permanent comptabilisé
	<ul style="list-style-type: none"> ● Dimension temporelle non considérée 	<ul style="list-style-type: none"> ● Dimension temporelle non considérée 	<ul style="list-style-type: none"> ● Dimension temporelle non considérée 	<ul style="list-style-type: none"> ● Dimension temporelle considérée
	<ul style="list-style-type: none"> ● Non-respect du bilan de masse des processus 	<ul style="list-style-type: none"> ● Respect du bilan de masse des processus 	<ul style="list-style-type: none"> ● Respect du bilan de masse des processus 	<ul style="list-style-type: none"> ● Respect du bilan de masse des processus
	<ul style="list-style-type: none"> ● Calcul d'impact non influencé par de potentiels choix ou erreurs de comptabilisation des flux de CO₂bio, mais influencé pour les autres flux de GES_{bio}, 	<ul style="list-style-type: none"> ● Calcul d'impact non influencé par de potentiels choix ou erreurs de comptabilisation des flux de CO₂bio, mais influencé pour les autres flux de GES_{bio} 	<ul style="list-style-type: none"> ● Calcul d'impact influencé par de potentiels choix ou erreurs de comptabilisation des flux de carbone 	<ul style="list-style-type: none"> ● Calcul d'impact influencé par de potentiels choix ou erreurs de comptabilisation des flux de carbone

	Inventaire = 0/0	FC=0/0	FC=-1/+1	Dynamique
Enjeux opérationnels	<ul style="list-style-type: none"> ● Pas d'étape de collecte de données pour les flux de CO₂ biogéniques 	<ul style="list-style-type: none"> ● Collecte de données nécessaire pour les flux de CO₂ biogéniques 	<ul style="list-style-type: none"> ● Collecte de données nécessaire pour les flux de CO₂ biogéniques 	<ul style="list-style-type: none"> ● Collecte de données nécessaire pour les flux de CO₂ biogéniques et ajout de la dimension temporelle pour l'ensemble des flux d'inventaire
	<ul style="list-style-type: none"> ● Analyse de sensibilité avec d'autres méthodes de comptabilisation impossible 	<ul style="list-style-type: none"> ● Analyse de sensibilité avec d'autres méthodes de comptabilisation possibles 	<ul style="list-style-type: none"> ● Analyse de sensibilité avec d'autres méthodes de comptabilisation possibles 	<ul style="list-style-type: none"> ● Analyse de sensibilité avec d'autres méthodes de comptabilisation possibles
	<ul style="list-style-type: none"> ● Analyse de contribution faussée 	<ul style="list-style-type: none"> ● Analyse de contribution faussée 	<ul style="list-style-type: none"> ● Analyse de contribution non faussée 	<ul style="list-style-type: none"> ● Analyse de contribution non faussée
	<ul style="list-style-type: none"> ● Pas d'attention particulière à porter sur la modélisation des flux de carbone (frontières du système, multifonctionnalité, , traçabilité (<i>mass-balance</i>)) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Pas d'attention particulière à porter sur la modélisation des flux de carbone (frontières du système, multifonctionnalité, , traçabilité (<i>mass-balance</i>)) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Attention particulière à porter sur la modélisation des flux de carbone (frontières du système, multifonctionnalité, , traçabilité (<i>mass-balance</i>)) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Attention particulière à porter sur la modélisation des flux de carbone (frontières du système, multifonctionnalité, traçabilité (<i>mass-balance</i>))

Des pastilles de couleurs indiquent si la caractéristique listée est davantage un atout (pastille verte), un inconvénient (pastille rouge) ou ni l'un ni l'autre (pastille orange) relativement aux autres méthodes

2.3 Enjeux méthodologiques

Cette section regroupe et détaille les enjeux méthodologiques liés au suivi des flux de carbone influençant la comptabilisation avec l'approche FC=-1/+1 (section 2.3.1) ; la description de l'approche, ou plutôt des approches d'ACV dynamique (section 2.3.2), et la prise en compte spécifique des flux de carbone liés à l'usage et à la transformation des terres qui sont une catégorie à part des flux de carbone biogénique (section 2.3.2.1).

2.3.1 Suivi des flux de carbone

Les enjeux détaillés dans cette section sont des enjeux qui influencent le suivi des flux de carbone à l'intérieur du système de produit, mais également entre plusieurs systèmes de produit. Si le bilan des flux de carbone biogéniques entrants et sortants est modifié, cela entraînera une répercussion lorsque l'approche FC=-1/+1 est utilisée. Le choix des frontières du système, la méthode choisie pour traiter la multifonctionnalité et les enjeux liés à la traçabilité (*mass-balance*) sont susceptibles de modifier les flux de carbone biogéniques modélisés dans l'ACV.

2.3.1.1 Choix des frontières du système

2.3.1.1.1 La définition des frontières du système en ACV

Si l'objectif premier d'une ACV est de prendre en compte l'ensemble du cycle de vie du produit, il arrive dans certains cas que des étapes soient exclues des frontières du système. On distingue couramment plusieurs types d'ACV en fonction des frontières du système. Les définitions ci-dessous sont celles du ILCD Handbook (2010):

- « **du berceau au tombeau** » (*cradle-to-grave* en anglais) : inclusion de l'ensemble des étapes du cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement de fin de vie ;
- « **du berceau à la porte** » (*cradle-to-gate* en anglais) : inclusion de l'ensemble des étapes du cycle de vie jusqu'à la sortie du produit de l'usine. C'est souvent le cas dans les déclarations environnementales de produit (DEP) (Environmental Product Déclarations, EPDs) qui visent à permettre la comparaison de l'impact environnemental des produits disponibles sur le marché sans nécessairement inclure les étapes d'utilisation et de fin de vie ;
- « **de la porte à la porte** » (*gate-to-gate* en anglais) : inclusion des processus dans les frontières de l'usine, depuis l'arrivée des intrants dans l'usine jusqu'à la sortie du produit de l'usine.

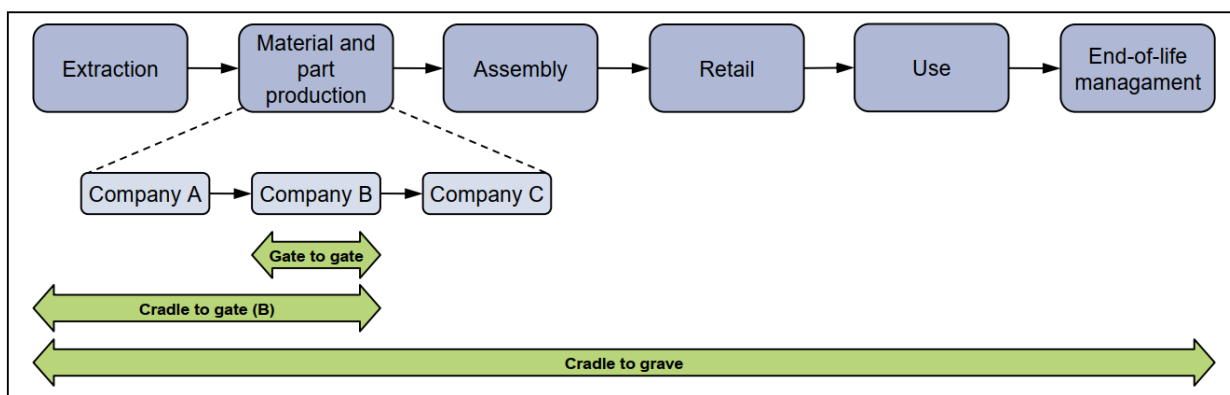


Figure 2-5 : Arbre de processus et frontières du système de la porte à la porte, du berceau à la porte et du berceau au tombeau (reproduit du ILCD Handbook (2010)).

Dans les DEP, les étapes du cycle de vie sont séparées en modules. Par exemple, la Figure 2-3 donne le vocabulaire employé dans la norme EN 15804+A2 (2019) qui régit les DEP pour les produits de construction.

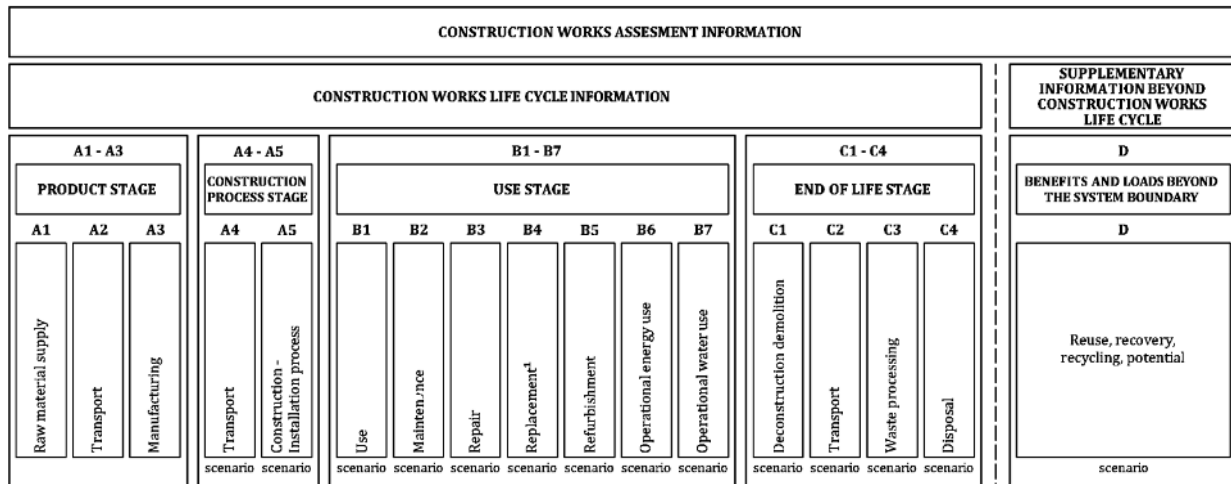


Figure 2-6 : Types de DEP en ce qui concerne les étapes du cycle de vie couvertes et les étapes et modules du cycle de vie pour l'évaluation des travaux de construction (reproduit à partir de la norme EN 15804+A2 (2019)).

2.3.1.1.2 Frontières du système et carbone biogénique

Si le système de produit contient du carbone biogénique, le choix des frontières du système est particulièrement important. Si les frontières du système ne prennent pas en compte l'ensemble des étapes d'absorption et d'émissions des GES biogéniques :

- Il y a un **risque de sous-estimer l'impact si l'étape du cycle de vie pendant laquelle les GES biogéniques sont émis n'est pas incluse dans les frontières du système**. Par exemple, un producteur de produit en bois peut faire son ACV « du berceau à la porte ». Dans ce cas, l'absorption de GES biogénique est prise en compte, mais pas l'émission en fin de vie. Le produit est déclaré comme négatif en carbone, ce qui est juste considérant les frontières du système établies (davantage que les résultats donnés par l'approche FC=0/0), mais peut mener à des erreurs d'interprétation. Par exemple, ces résultats pourraient laisser penser que le produit est un puits de carbone ;
- **risque de surestimer l'impact si l'étape d'absorption de CO₂ de l'atmosphère n'est pas incluse dans le système**. Par exemple, si l'ACV est « de la porte au tombeau », l'étape de séquestration de carbone biogénique n'est pas prise en compte. Seule l'émission est considérée, ce qui fausse le bilan de carbone biogénique sur le cycle de vie complet. C'est par exemple le cas des ACV de traitement de déchets menées en approche *cut-off* : les impacts du cycle de vie du déchet sont attribués au cycle de vie du déchet précédant le traitement. Les déchets sont considérés des intrants sans impact dans le système de produit considéré. Plus de détails sur les enjeux de l'approche *cut-off* sont donnés dans la section 2.3.1.2.2 ;
- risque de **double comptage pour les produits pouvant appartenir à plusieurs systèmes de produit**. Si on prend l'exemple d'une poutre en bois, celle-ci peut être considérée à la fois comme un produit final de l'industrie forestière, comme un intrant pour l'industrie du bâtiment et comme une source d'énergie pour produire de la chaleur ou de l'électricité. La même matière est produite et utilisée dans différents systèmes techniques par une logique en cascade. Si l'on veut éviter le "double comptage", l'utilisation multiple d'une même matière doit être clarifiée. Une allocation aux différents systèmes techniques doit être définie (Hoxha et al., 2020).

2.3.1.1.3 Déclaration du contenu en carbone biogénique

Afin de permettre l'inclusion d'un intrant contenant du carbone biogénique dans les frontières du système, les normes demandent généralement de **déclarer le contenu en carbone biogénique des produits**, particulièrement quand le produit est considéré comme un produit intermédiaire. Cette donnée peut donc être facilement réutilisée dans les ACV subséquentes pour lesquelles le produit est un intrant.

2.3.1.2 Multifonctionnalité

2.3.1.2.1 Enjeux liés à la multifonctionnalité en ACV

La section suivante est tirée en grande partie du rapport sur la biomasse énergie, qui explique très clairement les différentes approches de multifonctionnalité en ACV (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022).

Il arrive qu'un processus fournisse plusieurs flux économiques, alors que seul l'un d'entre eux est d'intérêt dans le cadre de l'ACV qui est menée. Par exemple, plusieurs produits en bois sont issus d'un même processus de foresterie, mais seul l'un de ces produits est un intrant du système étudié. Ces processus sont dits multifonctionnels, car ils fournissent plusieurs fonctions à la fois. Plusieurs approches pour traiter la multifonctionnalité d'un système afin d'en isoler une fonction existent en ACV. Ces approches dépendent de la nature du flux économique considéré (si ce dernier est un coproduit, un sous-produit ou un déchet) et si le produit entre dans le système ou ressort du système.

Voici les catégories de flux économiques selon leur valeur économique telle que définie par *ecoinvent*, base de données largement utilisée en ACV (entre guillemets = nomenclature *ecoinvent*) :

- **coproduits** / « *allocatable products* » : ces flux ont une valeur économique. Ex. Électricité coproduite ;
- **sous-produits** / « *recyclable materials* » : ces flux ont peu ou pas de valeur économique, mais il y a un intérêt à les collecter pour les réutiliser ou recycler dans d'autres processus. Les résidus peuvent par exemple faire partie de cette catégorie ;
- **déchets** / « *waste products* » : ces flux n'ont pas de valeur économique et il n'y a pas d'intérêt pour les collecter sans compensation financière. Ex. eaux usées.

La norme ISO 14044 (2006) régissant les grands principes de la méthodologie ACV propose une hiérarchie pour le choix des approches pour traiter la multifonctionnalité en ACV. Elles sont présentées ici par ordre de préséance selon ISO.

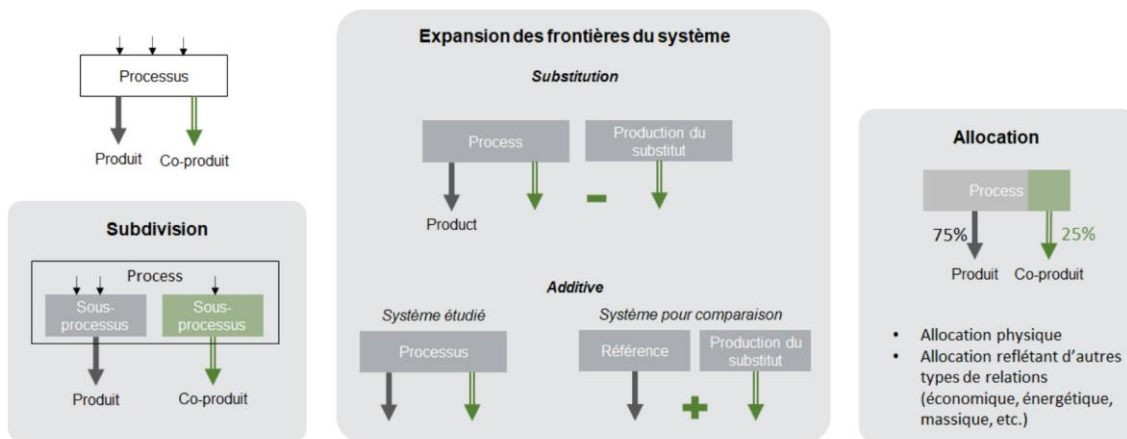


Figure 2-7: Illustration des différentes approches pour traiter la multifonctionnalité en ACV (reproduit de (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022)).

- **Subdivision.** Cette approche consiste à séparer un processus apparemment multifonctionnel en processus monofonctionnel. Elle s'applique généralement dans le cas de processus qui ne sont pas réellement des processus multifonctionnels et où il est possible de distinguer les flux nécessaires à la production de chaque produit.
- **Expansion des frontières du système.** Cette approche consiste à élargir les frontières du système pour y inclure les fonctions additionnelles liées aux coproduits. L'expansion des frontières du système peut s'appliquer de 2 façons différentes pour rendre les systèmes étudiés équivalents. L'expansion des frontières du système **soustractive**, couramment appelée *substitution*, consiste à rendre le système monofonctionnel en soustrayant les impacts des produits substitués par les coproduits. L'expansion des frontières du système **additive** consiste à redéfinir l'unité fonctionnelle du système pour y inclure les fonctions additionnelles. Dans ce cas, les frontières du système comparé devront aussi être élargies pour y inclure les impacts des produits substitués par les coproduits. À noter que ces deux approches sont mathématiquement équivalentes.

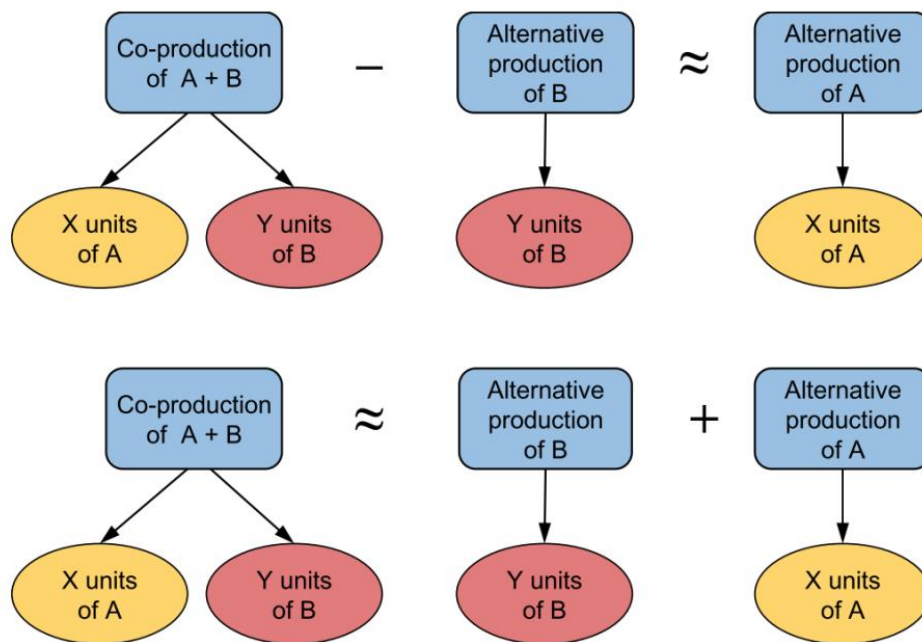


Figure 2-8: Illustrations de l'expansion des frontières du système par approche soustractive (= substitution) en haut ou approche additive en bas.

- **Allocation** : cette approche consiste à répartir les impacts générés par un processus et son amont entre ses différents coproduits ou co-fonctions selon une règle de répartition définie. ISO 14044 distingue plusieurs types d'allocations par ordre de préférence.
 - **Allocation reflétant des relations physiques sous-jacentes**, aussi appelées **allocation physique**, qui est basée sur un principe de causalité physique entre les coproduits. Par exemple, une réaction chimique où la proportion des produits peut être contrôlée en fonction des proportions des réactifs en entrée est un exemple de production combinée avec des quantités de co-produit pouvant varier indépendamment. Dans ce cas, les quantités d'entrants et de sortants allouées à chaque produit de la réaction sont basées sur des rapports stœchiométriques.
 - **Allocation reflétant d'autres types de relations**, comme les relations économiques ou d'autres propriétés communes des co-produits comme l'exergie. L'allocation économique vise à donner une plus grande responsabilité aux co-produits de grande valeur, pour qui le processus a le plus de chance d'exister. Cette approche est valable en particulier lorsque la différence de valeur entre les co-produits est élevée. Par exemple, dans le cas d'un processus d'extraction minière, l'allocation économique permet d'allouer un impact environnemental bien plus élevé pour le minerai extrait que pour les résidus miniers, tandis qu'une allocation massique aurait eu l'effet inverse. En revanche, un des désavantages de l'allocation économique est de corréliser la valeur économique d'un produit et son impact environnemental.

Les sous-produits peuvent être impliqués de deux façons différentes dans un système de produit :

- **sous-produit sortant** : une des co-fonctions du système est de générer un sous-produit à l'une des étapes du cycle de vie. Ex. génération de digestat lors de la production de biogaz ;

- **sous-produit entrant** : une des co-fonctions du système est de traiter un résidu issu d'un autre système. Le processus qui valorise le sous-produit peut parfois être désigné comme un processus de recyclage. Ex. traitement du fumier issu de la production de lait de vache.

La multifonctionnalité créée par les sous-produits entrants ou sortants est souvent traitée avec des approches adaptées. Les approches décrites ci-dessous sont illustrées dans la Figure 2-9.

- Approche **contenu en recyclé, ou cut-off** (cette approche est également appliquée pour les déchets) :
 - les frontières du système commencent avec la distribution du sous-produit entrant, incluant donc les impacts de sa collecte, son stockage éventuellement et son prétraitement avant conversion. Aucun impact de la production n'est attribué au **sous-produit entrant** ;
 - aucun impact n'est attribué au **sous-produit sortant** pour son futur utilisateur, tous les impacts étant attribués au système étudié. La valorisation du sous-produit sortant n'est pas incluse dans les frontières du système.
- Approche **allocation au point de substitution** :
 - une partie des impacts liée à la production du **sous-produit entrant** est attribuée au système étudié selon la règle d'allocation qui a été choisie (ex. : allocation économique, massique...). Par exemple, une partie des impacts de la production de lait de vache, dont est issu le fumier, sera attribuée au système étudié ;
 - la valorisation du **sous-produit sortant** est incluse dans les frontières du système jusqu'à l'obtention du produit substituable. L'allocation des impacts sera donc calculée en fonction de la quantité de produit substituable généré, et non de sous-produit sortant. Par exemple, le digestat issu de la production du biogaz doit être traité (séparation phase liquide et solide, séchage) avant de pouvoir être valorisé en engrais organique, qui lui est directement substituable à des engrais minéraux.
- Approche **expansion des frontières du système par substitution** :
 - la filière à laquelle se substitue le fait de traiter le **sous-produit entrant** avec le système étudié est incluse dans les frontières du système, et les impacts de cette filière seront soustraits à ceux du système étudié. Par exemple, les impacts de la valorisation usuelle du fumier en engrais seront soustraits au système de production de biogaz à partir de fumier ;
 - la valorisation du **sous-produit sortant** est incluse dans les frontières du système jusqu'à l'obtention du produit substituable, et les impacts de la filière à laquelle se substitue le produit substituable seront soustraits à ceux du système étudié. Par exemple, la production d'engrais organique à partir du digestat remplace la production d'engrais minéraux, les impacts de la production d'engrais minéraux seront donc soustraits au système de production de biogaz en fonction de la quantité substituée de nutriments agronomiques.

Les déchets peuvent également sortir ou entrer dans un système de produit. **Les déchets sont souvent traités avec une approche contenu en recyclé ou cut-off** : aucun impact n'est attribué aux déchets sortants, aucun impact de la production des déchets n'est attribué aux déchets entrants, et les frontières du système commencent avec la distribution du déchet entrant (collecte, tri...). Les systèmes de produit valorisant des déchets en entrée fournissent toujours au moins 2 co-fonctions : générer la fonction principale et traiter un déchet. **La co-fonction de traitement de déchet peut également être traitée selon l'approche « avoided burden » par expansion des frontières du système par substitution**

en supposant que les impacts du traitement usuel du déchet sont évités. Cette approche est essentiellement utilisée en ACV conséquentielle lorsqu'il peut être montré que le "recyclage" des déchets soit une nouvelle voie de traitement qui remplace ou remplacera en effet la voie traditionnelle. Ex. valoriser la fraction organique des déchets municipaux en biogaz évite le traitement de ces déchets par des voies alternatives, comme le compostage, l'incinération ou l'enfouissement.

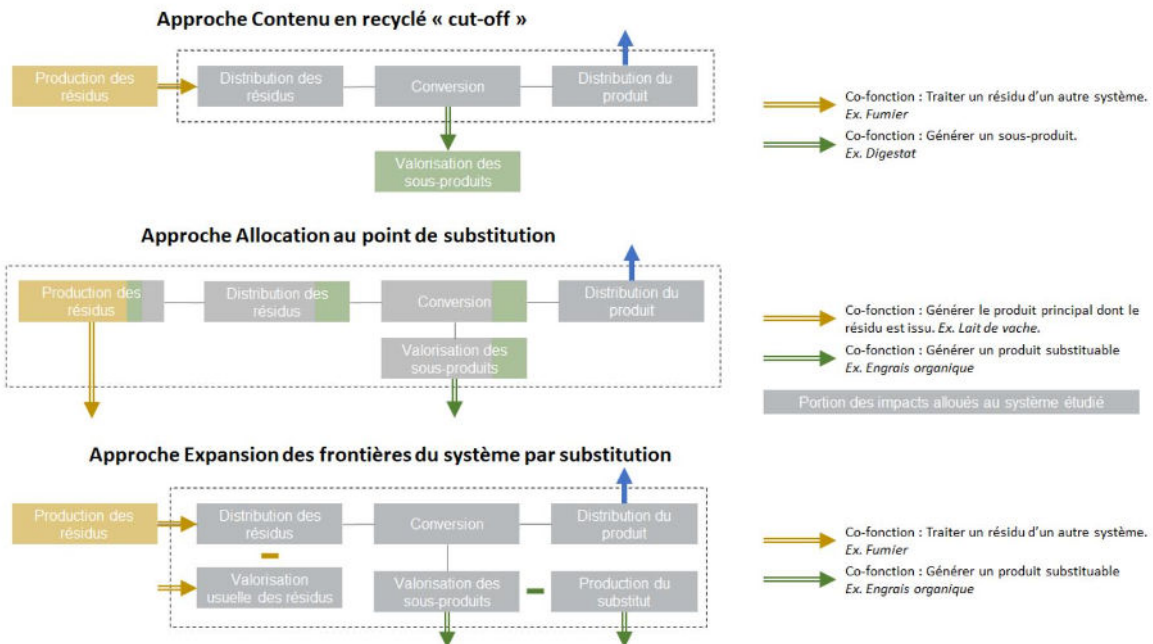


Figure 2-9: Illustration des principales approches pour traiter la multifonctionnalité liée aux sous-produits entrants (ici un résidu) ou sortants (reproduit de (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022)).

2.3.1.2.2 Flux de carbone biogéniques et multifonctionnalité

Le choix de l'approche pour traiter la multifonctionnalité est crucial pour les flux de carbone biogéniques lorsque la méthode -1/+1 est appliquée.

- Dans le cas de multifonctionnalité pour un co-produit.
 - **Approche par expansion des frontières du système** : pas d'enjeu si les étapes de séquestration et d'émission de carbone biogénique sont incluses également dans les frontières considérées pour le produit de substitution. En pratique, ce n'est pas toujours le cas. Lorsque l'étape de séquestration n'est pas incluse pour le produit substitué, l'impact du produit substitué est surestimé, et l'impact final du système est sous-estimé. A l'inverse, lorsque l'étape d'émission n'est pas incluse pour le produit substitué, l'impact du produit substitué est sous-estimé, et l'impact final du système est surestimé. La vision cycle de vie doit aussi s'appliquer aux produits substitués.
 - **Approche par allocation** : si l'allocation n'est **pas basée sur le contenu en carbone biogénique des produits**, alors les flux de **carbone biogénique en amont** de l'allocation ne correspondent plus aux flux physiques, mais aux flux alloués ; tandis que pour les étapes subséquentes, non allouées, les émissions correspondent toujours aux flux physiques de carbone biogénique dans le système. Il y a donc un déséquilibre du bilan de carbone biogénique. Le suivi des flux de carbone biogénique peut être perturbé **même dans le cadre d'une allocation massique, si les co-produits ne contiennent pas la même proportion de carbone biogénique.**

Exemple : la production de blé est un processus multifonctionnel dont deux produits sont issus : les grains de blé (produit principal) et la paille (co-produit). Dans ce cas, si on considère que le blé et la paille ont le même contenu en carbone biogénique par kilogramme, une allocation massique ne perturbe pas le bilan de carbone biogénique. En revanche, une allocation économique allouerait une plus grande partie de l'impact environnemental du processus aux grains de blé, car ils ont une valeur marchande plus élevée que la paille (à masse équivalente). Ainsi, dans une ACV du berceau au tombeau des grains de blé, la valeur du flux de carbone biogénique absorbé à l'étape de la pousse de la plante aurait une valeur plus élevée que le flux de carbone biogénique que la plante aurait réellement séquestré, tandis que les flux de GES libérés en fin de vie resteraient inchangés et reflèteraient le contenu en carbone biogénique réel des grains de blé. Le bilan net des flux de carbone serait sous-estimé : en réalité, la plante n'a pas absorbé la quantité de carbone qui lui serait allouée par allocation économique. À noter que l'allocation économique est l'allocation par défaut dans *ecoinvent* (voir section 4.3.5 pour plus de détail).

- Pour un **sous-produit ou déchet entrant ou sortant** du système.
 - **Approche contenu en recyclé = cut-off** : l'enjeu de l'approche « cut-off » est qu'elle exclut des frontières du système considéré des étapes du cycle de vie dans lesquelles il peut y avoir une séquestration ou une émission de carbone biogénique pour les attribuer aux systèmes précédents ou suivants, ce qui déséquilibre le bilan de carbone biogénique, au moins pour le système considéré. Le problème est donc similaire à celui abordé plus largement pour les frontières du système : selon les étapes exclues, l'impact peut être sous-estimé, ou surestimé dans le système considéré et les systèmes juxtaposés (section 2.3.1.1.2).

Exemple pour un sous-produit ou déchet entrant : dans le cadre de production d'énergie à partir de biogaz issu de la digestion de déchets organiques, les déchets arrivent sans impact dans le système de produit. Ainsi, l'étape de séquestration du carbone biogénique, en amont du cycle de vie du déchet, est attribuée au système précédent et est exclue du système considéré. L'émission de GES biogéniques est comptabilisée, mais pas la séquestration, et l'impact est surestimé dans le système considéré, et sous-estimé dans le système précédent.

Exemple pour un sous-produit ou déchet sortant : dans le cas de recyclage d'un polymère contenant du carbone biogénique, les étapes de recyclage et toutes les étapes subséquentes sont attribuées au système suivant et sont exclues du système considéré. Le carbone biogénique séquestré ne ressort pas du produit dans les frontières du système considéré. Ainsi, la séquestration de carbone biogénique est comptabilisée, mais pas l'émission, et l'impact est sous-estimé dans le système considéré, et surestimé dans le suivant.

- **Approche allocation au point de substitution** : cette approche « décale » seulement le point de coupure entre le système précédent, le système considéré et le système suivant. Si la coupure survient entre l'étape d'absorption de carbone biogénique et l'étape d'émission de GES biogéniques, alors les enjeux sont similaires aux enjeux décrits pour l'approche *cut-off*. On exclut potentiellement des frontières du système des flux de carbone biogéniques s'ils sont liés à des sous-produits ou déchets.

2.3.1.3 Chaînes de traçabilité

Dans notre économie, les produits font partie d'une chaîne de valeur dans laquelle interviennent plusieurs acteurs. La traçabilité des produits est essentielle pour assurer transparence et confiance tout le long de la chaîne. Des informations accompagnent les produits : origine, pratiques de production, composition des matières premières... et impact environnemental. Cependant, ces informations ne sont pas toujours liées à la réalité physique du produit, mais peuvent être basées sur des quotas ou des marchés. Plusieurs modèles de chaînes de traçabilité existent, et certains d'entre eux font apparaître des enjeux pour la comptabilisation du carbone biogénique.

2.3.1.3.1 Différents modèles de chaînes de traçabilité

Selon un rapport de la Fondation Ellen Mc Arthur (Ellen Mc Arthur Foundation (n.d.)), il existe quatre modèles de chaîne de traçabilité qui lient un entrant (par exemple « durable », « recyclé » ou « biologique » selon une certaine définition) et le produit final sortant. Ces quatre chaînes sont différentes par la nature du lien (pouvant être physique ou déclaratif) et la possibilité ou non de séparer les flux physiques dans la chaîne.

La Figure 2-10 illustre ces quatre chaînes de traçabilité qui sont détaillées dans le paragraphe suivant.

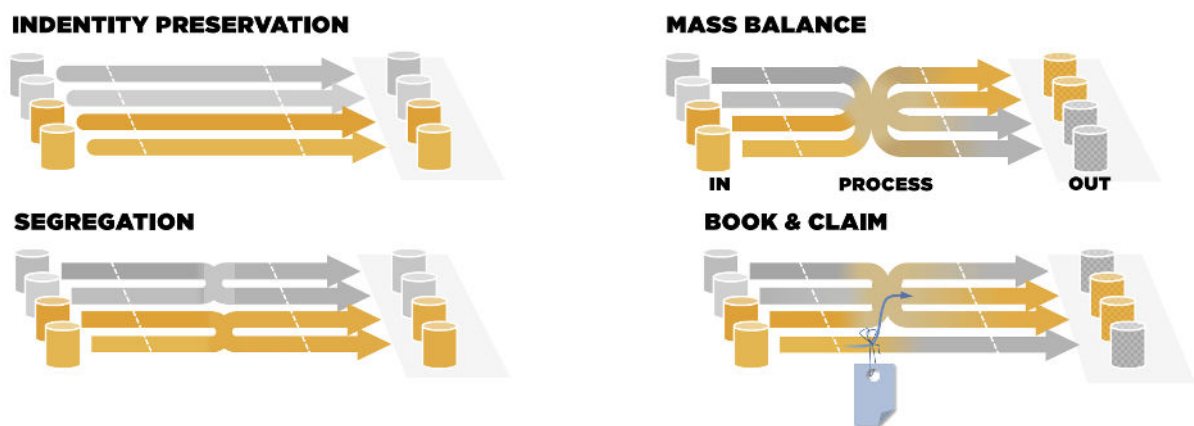


Figure 2-10: Quatre types de chaînes de traçabilité. (reproduit de (Ellen Mc Arthur Foundation, n.d.)).

Dans la Figure 2-10, le terme « flux » est utilisé de manière générique et peut désigner un produit, un matériau, un intrant, de l'énergie... Afin de simplifier l'explication, on considère un ensemble de flux entrants pouvant être qualifiés de « certifiés » ou de « non certifiés ». Quatre flux sont schématisés pour illustrer les chaînes de traçabilité. Les quatre cylindres de gauche représentent quatre origines différentes pour ces intrants. Les quatre cylindres de droite représentent quatre produits possibles, issus des intrants potentiellement mélangés ou non. Les flux apparaissant en gris sont considérés « non certifiés » et les flux apparaissant en orange sont considérés « certifiés ».

- **Le modèle « Préservation de l'identité »** est le modèle où les flux ne sont pas mélangés. Ainsi, chaque chaîne de valeur, « certifiée » ou « non-certifiée », est unique, et les flux restent physiquement séparés. Ce modèle n'est applicable que si les flux peuvent être identifiables individuellement.

Exemple : une denrée alimentaire ayant une appellation d'origine contrôlée provient de l'origine qui est spécifiée dans l'appellation. La certification garantit que le produit que l'on a entre les mains provient physiquement de l'origine donnée.

- Dans le **modèle « Ségrégation »**, des flux provenant de différentes sources peuvent être mélangés au sein d'une catégorie commune, mais les catégories de flux restent physiquement séparées : les flux « certifiés » peuvent être mélangés entre eux, les flux « non certifiés » peuvent être mélangés entre eux, mais les flux « certifiés » ne peuvent pas être mélangés avec les flux « non certifiés ».

Exemple : les aliments certifiés biologiques peuvent provenir de différentes exploitations agricoles ayant différentes pratiques, mais ces pratiques respectent toutes les critères pour être certifiées biologiques.

- Dans le **modèle « Mass balance »**, lorsqu'il n'y a aucune différence physique ou chimique entre les flux, l'ensemble des flux peut être mélangé même s'ils ne sont pas considérés équivalents : les flux « certifiés » et « non-certifiés » peuvent être mélangés. Cela peut arriver, par exemple, lorsque les quantités des flux provenant des sources certifiées sont trop faibles pour être expédiés, stockés ou traités séparément. Le modèle *mass-balance* garantit que la proportion de flux « certifiés » introduits dans la chaîne de valeur pour un acteur est égale à la proportion de flux « certifiés » vendus par cet acteur (en prenant en compte les pertes et rendements des processus intermédiaires en jeu, s'il y en a). Ainsi, un flux certifié n'est pas nécessairement issu à 100% de flux certifiés entrants et peut contenir une proportion de flux non certifiés, mais la certification garantit que la quantité totale de flux certifiés distribués par l'acteur correspond à la quantité totale de flux certifiés entrants dans la chaîne de valeur de l'acteur avant potentiel mélange.

Exemple : le label FAIRTRADE (commerce équitable) propose une étiquette spécifique (avec une flèche) pour le cacao, le sucre, les jus de fruit et le thé fabriqués avec l'approche du *mass-balance* : les entreprises achètent 100% du volume des ingrédients qu'ils labellisent comme étant FAIRTRADE, mais peuvent les mélanger avec des ingrédients non FAIRTRADE à une étape de la chaîne d'approvisionnement. La quantité totale de produits vendus comme étant FAIRTRADE correspond à la quantité d'intrants FAIRTRADE achetés par l'entreprise, bien que le produit lui-même ne soit pas à 100% issu d'intrants FAIRTRADE (Fairtrade International, n.d.).

- Dans le **modèle « Book and claim »**, la certification du flux est complètement indépendante des propriétés physiques du flux. Contrairement au modèle du *mass-balance* où un bilan de masse doit être respecté par l'entreprise, dans le modèle *book and claim*, le bilan de masse est respecté au niveau du marché. Une quantité de certificats est issu par un organisme indépendant en amont de la chaîne de valeur, basé sur la quantité réelle de flux respectant les critères pour être « certifiés » sur le marché, mais les certificats sont ensuite échangeables librement et indépendamment des flux physiques entre les acteurs.

Exemple : l'électricité renouvelable est échangée sur un marché indépendamment de la façon de la produire. Ainsi, un client qui achète de l'électricité certifiée "verte" reçoit la même électricité que les autres utilisateurs reliés au réseau, qui est produite à partir de plusieurs technologies. Cependant, le modèle de traçabilité garantit qu'il n'est pas possible d'acheter plus d'électricité « verte » que l'électricité effectivement produite de manière durable sur le marché.

De nombreuses certifications suivent plusieurs de ces modèles. Par exemple, le label FSC (*Forest Stewardship Council*) garantit que le bois certifié est issu de forêts gérées de manière durable et propose trois étiquettes : le FSC 100% qui indique que le produit est fabriqué à partir de 100% de fibres de bois provenant de forêts certifiées, le FSC recyclé qui indique que le produit est fait 100% de fibres recyclées et l'étiquette FSC mixte qui certifie que le produit est fait à partir d'une combinaison de fibres certifiées et non certifiées. Cette étiquette impose un contenu minimal de 70% en fibre certifiée. Les deux premières étiquettes suivent l'approche de ségrégation, tandis que la troisième a une approche *mass-balance* (Forest Stewardship Council, n.d.). Le rapport de la Fondation Ellen Mc Arthur (Ellen Mc Arthur Foundation, n.d.) donne d'autres exemples de chaînes de traçabilité pour différents produits.

2.3.1.3.2 Les flux de carbone biogéniques et traçabilité (*mass-balance*)

Avec l'utilisation de l'approche -1/+1, la traçabilité des flux de carbone biogéniques est essentielle pour correctement quantifier l'impact environnemental du produit. Comme la traçabilité ne reflète pas toujours le contenu en carbone « réel », ou physique, du produit, notamment dans les modèles *mass-balance* et *book and claim*, la cohérence tout au long de la chaîne de valeur est difficile à garantir.

D'une part, il n'est pas toujours possible de connaître le contenu en carbone biogénique réel d'un produit si cette information n'est pas déclarée. Il est parfois possible d'effectuer des analyses afin d'accéder à l'information (par exemple, analyses au carbone 14). Si la valeur réelle, connue ou mesurée, est différente de la valeur déclarée dans la certification, le praticien peut choisir d'utiliser le contenu en carbone biogénique réel ou déclaré dans son ACV.

Historiquement en ACV, le problème s'est déjà posé, notamment pour l'approvisionnement en électricité « verte » qui suit un modèle *book and claim*. Généralement, lorsqu'un producteur déclare qu'il paie pour être approvisionné en électricité 100 % renouvelable, la source d'électricité est considérée comme telle dans l'ACV, même si, dans le réseau électrique, il n'est pas possible de distinguer physiquement une électricité provenant d'une source renouvelable d'une électricité provenant d'une source fossile. On ne peut que la distinguer "commercialement" (Doka, 2024). C'est l'approche *market based*, contrairement à l'approche *location-based* dans laquelle l'impact moyen de la production d'électricité est attribué au kilowattheure selon la localisation. L'application de l'approche *market based* implique d'utiliser des mix électriques résiduels (mix électriques auxquels la production d'électricité verte a été soustraite) pour les autres processus utilisant de l'électricité non certifiée. Cette approche n'est pas autorisée dans l'ensemble des cadres normatifs, mais l'est par exemple dans le SBTi. Cette approche pose encore à l'heure actuelle plusieurs enjeux en ACV (Brander & Bjørn, 2023; Holzapfel et al., 2023).

Il est possible de ne pas adhérer à ce modèle en avançant l'argument que les impacts environnementaux quantifiés grâce à l'ACV doivent être basés autant que possible sur des flux physiques réels, et que les impacts environnementaux devraient donc être alloués selon la réalité physique, et non déclarative. Cependant, il serait impossible d'exiger une connexion physique pour les flux d'électricité ou de gaz naturel directe entre les producteurs verts et les consommateurs prêts à financer une production verte. De plus, les résultats d'une ACV basée sur les flux physiques ne reflèteraient pas la volonté ou les efforts des acteurs ayant délibérément choisi d'acheter ou de vendre une certaine certification pour une raison environnementale. Ainsi, choisir de prendre en compte le contenu en carbone biogénique réel plutôt que certifié n'encourage pas l'inclusion de carbone biogénique certifié dans les produits, puisqu'aucun avantage environnemental n'est donné aux produits certifiés. Bien que les approches *mass-balance* et *book and claim* soient plus ou moins décorréliées de la réalité physique, la quantité de produits certifiés disponibles sur le marché reflète la quantité totale réelle, physique, disponible.

Pour garantir le bon fonctionnement du système, plusieurs éléments cruciaux doivent être pris en compte, **quel que soit le choix effectué** :

- **transparence** : il est impératif de veiller à ce que l'information soit aisément accessible à toutes les étapes de la chaîne de valeur. Cela nécessite une spécification claire du choix effectué, que ce soit l'utilisation de contenu en carbone biogénique certifié ou réel ;
- **contrôle** : Des entités indépendantes doivent être en place pour surveiller et garantir qu'il n'est pas vendu plus de "produit certifié" que ce qui est réellement disponible sur le marché. Dans le cas contraire, le système s'expose à un risque de fraude ;
- **standardisation des pratiques en ACV** : cet aspect doit être intégré et clarifié dans les normes régissant les ACV et les DEP. Sans une uniformisation adéquate, les performances environnementales des produits ne sont pas comparables ;

2.3.2 Aspect temporel/dynamique et stockage

2.3.2.1 Dimension dynamique de l'indicateur sur les changements climatiques utilisé en ACV statique

Historiquement, l'ACV est plutôt réalisée en statique et peu d'attention a été portée à la dimension temporelle. La norme ISO 14040 (2006) statue notamment que « *la pertinence environnementale de l'indicateur de catégorie ou du modèle de caractérisation doit être clairement énoncée dans les termes suivants : a) les (...) aspects temporels, tels que la durée, le temps de résidence, la persistance, le moment de l'émission, etc.* » (ISO 14040 (2006)). Ces paramètres, directement liés à des considérations dynamiques, sont généralement des paramètres définis par défaut qui sont liés au choix de la méthode de caractérisation utilisée en ACV statique.

De plus, lors de l'étape de caractérisation des impacts, historiquement, tous les flux élémentaires sont intégrés dans l'espace et le temps pour arriver à un impact potentiel final :

« *L'ACV porte sur les impacts potentiels sur l'environnement ; l'ACV ne prédit pas les incidences absolues ou précises sur l'environnement en raison de [...] l'intégration des données environnementales dans l'espace et dans le temps* » (ISO 14040 (2006)).

Cette intégration des flux élémentaires est de moins en moins courante pour l'aspect spatial, notamment avec le développement de bases de données de plus en plus régionalisées et des catégories d'impact où la variabilité spatiale est très grande. En revanche, la variabilité temporelle n'est pas très bien considérée pour le praticien moyen, même si de nombreux travaux ont été dédiés à étudier la question. Dans une ACV traditionnelle statique, seuls certains aspects dynamiques tels que le choix de l'horizon temporel des indicateurs et l'inclusion des émissions long-terme sont considérés de manière systématique.

Dans le cas des émissions de GES, spécifiquement, la considération de l'aspect temporel est très importante. Après une émission, la concentration atmosphérique de GES dans l'atmosphère diminue au cours du temps et par conséquent son impact évolue, comme montré à la Figure 2-3. Ainsi, le calcul dépend notamment :

- de l'**horizon temporel considéré** : en ACV statique, par défaut, l'horizon temporel de l'impact est généralement considéré à 100 ans. Cette valeur est davantage choisie par convention que justifiée scientifiquement : estimer les impacts environnementaux potentiels sur les 100 années après l'émission est jugé pertinent pour prendre une décision aujourd'hui. Le choix d'un horizon temporel peut aussi être vu comme une sorte d'actualisation qui permet de pondérer plus fortement les impacts à court terme, car au-delà de l'horizon défini, l'impact des émissions n'est pas considéré. Un horizon temporel fini permet également d'éviter les défis liés à une intégration des impacts à l'infini (incertitude, manque de données...) ;
- du **moment où l'émission a lieu** : en ACV statique, l'ensemble des flux d'inventaire mis en jeu à différentes étapes du cycle de vie sont sommés et on considère que les flux élémentaires sont émis (ou absorbés) en totalité au temps $t=0$.

Le choix de l'horizon temporel fait varier la valeur de l'impact sur les changements climatiques. Le GIEC fournit des valeurs pour d'autres horizons temporels (20 ans, 50 ans, 500 ans...). Par exemple, pour le méthane, gaz à temps de résidence relativement court dans l'atmosphère, la variation de l'horizon temporel influence énormément la valeur de son facteur de caractérisation (voir Figure 2-3 et Tableau 2-1). Pour un même horizon temporel de l'impact, considérer les flux élémentaires émis (ou absorbés) à différents moments au cours du cycle de vie considéré influence également l'impact environnemental calculé. Par exemple, si l'on intègre toutes les émissions à partir de l'année zéro et on considère un

horizon temporel fixé pour calculer l'impact potentiel, l'impact sera surestimé, puisque certaines émissions qui auront lieu vers la fin de vie du système seront comptabilisées dès l'année zéro. Ainsi, trois paramètres sont importants à considérer en ACV dynamique :

- **l'horizon temporel de l'impact (HTI) ;**
- **la durée du cycle de vie (DCV) :** période totale sur laquelle s'étend le cycle de vie considéré ;
- **la durée d'observation (DO) :** période totale sur laquelle s'étendent le cycle de vie et la période considérée pour l'impact environnemental.

En ACV statique, la durée du cycle de vie est réduite à un point à $t=0$, et la durée totale d'observation et l'horizon temporel de l'impact sont confondus. La Figure 2-11 illustre les différences entre la comptabilisation dynamique et statique.

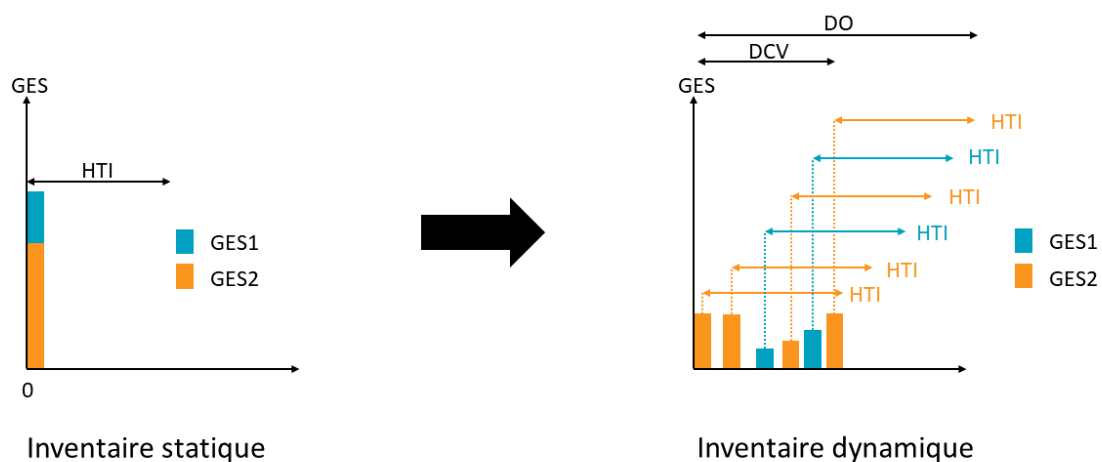


Figure 2-11: Effet de la prise en compte de l'aspect temporel des émissions cycle de vie (reproduit de Ventura (2023)).

Deux dimensions principales apparaissent quand on s'intéresse à l'aspect dynamique de la comptabilisation des flux de carbone biogéniques en ACV : la dynamique entre la captation et l'émission du carbone, et la question du stockage de carbone dans les matériaux et produits.

2.3.2.2 Dynamique entre la captation et l'émission du carbone

Dans l'approche statique par défaut, où tous les flux sont intégrés à l'année zéro et un horizon temporel fini est considéré, on suppose que l'émission et la captation du carbone par la biomasse ont lieu au même moment (à $t=0$). L'hypothèse de neutralité carbone suppose que leurs effets se compensent (voir section 2.2.1).

Or, en réalité, la séquestration et l'émission sont réparties dans le temps. On considère que pour les cultures annuelles qui présentent un cycle suffisamment court, il est possible de considérer que l'émission et la capture aient lieu en même temps (Patouillard, Maxime, Ménard, & Louineau, 2022). Contrairement aux approches Inventaire = 0/0, FC=0/0 et FC=-1/+1, les approches de comptabilisation dynamique permettent de quantifier plus précisément la quantité de carbone présente à chaque moment dans l'atmosphère puisque le délai entre l'émission et la séquestration peut faire en sorte qu'à court terme, l'impact sur le climat ne soit pas nul (Levasseur & Brandao, 2014).

La dynamique entre la captation et l'émission acquiert une grande importance lorsque l'écart temporel entre la séquestration et l'émission est grand. Par exemple, pour la biomasse provenant des forêts, où les cycles de récolte (dans le cas des forêts gérées) sont de plusieurs décennies, la prise en compte d'une telle période pour compenser la perte du carbone après une récolte est bien illustrée par des concepts comme le temps de recouvrement. La combustion de biocarburant génère généralement davantage de CO₂ biogénique que la combustion de combustible fossile pour fournir la même quantité d'énergie : c'est ce que l'on appelle la **dette de carbone**. Le temps de recouvrement correspond au temps nécessaire pour que la dette de carbone soit à nouveau séquestrée par la biomasse après une émission de GES biogéniques et que le bilan carbone du scénario bioénergie forestière soit égal à celui du scénario énergie fossile (Levasseur & Brandao, 2014).

De plus, dans le cas de la biomasse forestière (et plus généralement de tous les types de biomasses), plusieurs phénomènes interconnectés sont affectés à l'étape de récolte du bois. L'ensemble des flux de carbone biogénique associés à cette récolte ne sont pas toujours inclus : Head et al. (2019) introduit le concept de « *Ecosystem carbon cost* », qui détermine les conséquences sur la forêt environnante d'une récolte forestière, en quantifiant le flux net de carbone de la forêt vers l'atmosphère en fonction de l'espèce d'arbre, le type de gestion forestière et les conditions naturelles originales.

2.3.2.3 Le stockage de carbone

Stocker du carbone (par exemple, dans un produit) permet de repousser son émission dans le futur, et ainsi, dans une perspective à court terme, de diminuer l'impact environnemental (Levasseur & Brandão, 2013). Deux types de stockage sont considérés pour le carbone biogénique :

- **le stockage temporaire** peut être défini comme la captation de carbone biogénique dans une matière pendant une durée déterminée. Le stockage ne touche pas uniquement le carbone biogénique (ex. : carbonatation du béton, capture directe et stockage de carbone...). En conservant le carbone hors de l'atmosphère pendant une période déterminée, le stockage de carbone permet d'éviter le forçage radiatif que ce carbone aurait généré s'il se trouvait dans l'atmosphère pendant cette période. Plusieurs approches dynamiques sélectives ou dynamiques (voir sections suivantes) permettent de prendre en compte le stockage temporaire en accordant des crédits environnementaux ;
- **le stockage permanent** peut être défini en ACV statique comme un stockage temporaire qui s'étend au-delà de l'horizon temporel de l'impact. Ainsi, l'émission du carbone stocké a lieu après l'horizon temporel de l'impact et n'est donc pas comptabilisée. Par exemple, une partie des émissions issues de l'enfouissement de biomasse constituent un stockage permanent de carbone biogénique, car ces émissions ont lieu après 100 ans, horizon temporel le plus souvent utilisé en ACV statique. En ACV dynamique, s'il n'y avait pas d'horizon temporel défini, le concept de stockage permanent disparaîtrait.

Ces définitions montrent l'importance de la prise en compte de la dimension temporelle lors de la comptabilisation du carbone biogénique et ses impacts. Dans le cadre du stockage temporaire, la durée du stockage exerce une influence sur le forçage radiatif évité. Dans le cadre du stockage permanent, le choix de l'horizon temporel de l'inventaire détermine la période sur laquelle les émissions sont prises en compte. **Le système étudié et les objectifs de l'étude vont déterminer la pertinence de tenir compte de ces aspects.**

En ACV statique traditionnelle, le stockage temporaire n'est pas toujours comptabilisé. Seules certaines méthodes et normes proposent une comptabilisation quand le stockage dépasse les 10 ans (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010, PAS 2050 (2011), ISO 14067 (2018)). Ces approches restent discutables puisqu'elles ne considèrent l'aspect

dynamique que de manière sélective ; seul le stockage est traité de manière dynamique et pas d'autres phénomènes comme la croissance de la biomasse.

2.3.2.4 Approches de comptabilisation dynamiques sélectives

Le terme « dynamiques sélectives » est employé dans ce rapport pour décrire les approches qui visent à inclure seulement certains aspects dynamiques en ACV statiques. Ces approches permettent d'intégrer les aspects dynamiques entre la captation et l'émission et/ou liés au stockage, mais pas nécessairement pour l'ensemble de l'inventaire.

2.3.2.4.1 Approches tonne.année

Les premières méthodes pour tenir compte du stockage temporaire du carbone sont les **approches tonne.année (ton.year)**, qui visent à évaluer les bénéfices de décaler une émission dans le temps. Ces méthodes, développées au début des années 2000, permettent de calculer un impact évité en tonne.année, correspondant à l'impact évité en retardant l'émission d'une certaine quantité de carbone pendant un certain temps.

Les tonne.année peuvent être par la suite converties en tonnes de CO₂ équivalents évitées. Pour cela, le choix d'un horizon temporel est indispensable. Une fois l'horizon temporel choisi, un **temps d'équivalence** et un **facteur d'équivalence** sont calculés. Le temps d'équivalence détermine, à l'aide des courbes de concentration du CO₂, le temps pendant lequel le carbone séquestré devrait être stocké afin de compenser l'effet de forçage radiatif d'une émission de carbone. Le facteur d'équivalence (l'inverse du temps d'équivalence), indique la quantité de CO₂ évitée par un stockage pendant un temps déterminé (Brandão et al., 2019).

Les deux méthodes principales construites sur l'approche tonne.année sont les suivantes. Elles ont inspiré d'autres méthodes par la suite :

- **Méthode Moura-Costa** (Moura Costa & Wilson, 2000) : le bénéfice environnemental en tonne.année repose sur le calcul de la valeur en tonne.année équivalente à l'impact de l'émission d'un kilogramme de carbone pour un horizon temporel donné. Par exemple, pour un horizon temporel de 100 ans, l'impact environnemental de l'émission ponctuelle d'une tonne de CO₂ correspond à 48 tonnes.années. La séquestration du carbone pendant une période de 48 ans est considérée comme un retrait d'une tonne de CO₂ à l'année zéro suivie de l'émission d'une tonne de CO₂ à l'année 48, et l'impact évité correspond à l'impact de l'émission d'une tonne de carbone à l'année 0 sur une période de 100 ans. Graphiquement, sur la Figure 2-12, l'impact évité correspond à l'aire du rectangle bleu situé sous l'axe des abscisses, qui correspond également à l'aire sous la courbe représentée en bleu marine. À noter que cette méthode conduit à calculer des bénéfices en kilogramme de CO₂ équivalents supérieurs à la quantité de CO₂ stockée si la durée de stockage dépasse 48 ans. Pour cette raison, cette méthode est fortement critiquée (Brandão et al., 2013; Levasseur, Lesage, et al., 2012)²
- **Méthode de Lashof** (Fearnside et al., 2000) : avec cette méthode, le bénéfice environnemental en tonne.année correspond à l'impact environnemental repoussé au-delà de l'horizon temporel choisi en décalant l'émission à un moment ultérieur. Ce bénéfice est ensuite divisé par l'impact total de l'émission initiale pour calculer la quantité de CO₂ évitée. Les méthodes proposées par le ILCD Handbook (2010) et PAS 2050 (2011) sont des simplifications de cette méthode (Levasseur & Brandão, 2013). Graphiquement, sur la Figure 2-12, le bénéfice est représenté par l'aire sous la courbe au-delà de 100 ans (bleu clair).

² <https://carbonplan.org/research/ton-year-explainer>

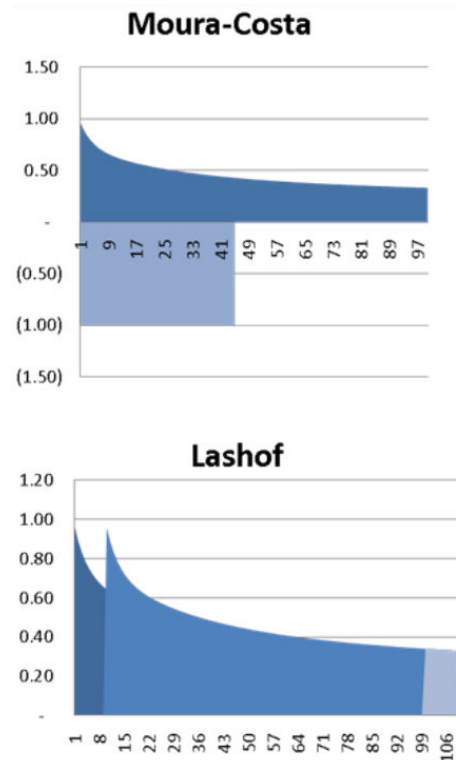


Figure 2-12: Méthodes tonne.année (reproduit de Brandão et al., 2019).

Les approches tonne.année sont des approches simples pour tenir compte de l'effet du stockage temporaire sur le bilan carbone du système étudié en ACV statique. Elles peuvent être appliquées autant au carbone biogénique qu'au carbone fossile (c'est par exemple ce qui est préconisé dans la PAS 2050 (2011), avec une approche simplifiée dérivée de la méthode de Lashof). Dans le cas du stockage dans le bois, il faudrait considérer d'autres aspects mentionnés précédemment tels que la dynamique des forêts ou la prise en compte des flux de carbone dans d'autres compartiments. Cependant, ces approches ne tiennent pas en compte de la dynamique entre séquestration et émission du carbone biogénique.

2.3.2.4.2 L'approche GWPbio

L'approche **GWPbio** est une approche développée par Cherubini et al. (2011a). À partir de l'approche FC=0/0, elle permet de calculer des facteurs de caractérisation pour les émissions de GES biogéniques qui vont venir remplacer le facteur de caractérisation nul en prenant en compte la dynamique entre la séquestration et l'émission du carbone biogénique et son stockage.

Cette méthode part du principe que même si le carbone biogénique émis sera compensé par la captation lors de la croissance de la biomasse, le CO₂ a un impact pendant la période où il reste dans l'atmosphère avant la captation par la biomasse. La méthode part de l'hypothèse qu'une quantité égale d'arbres récoltés commencerait à pousser immédiatement après le processus de production du produit contenant du carbone biogénique. Des facteurs de caractérisation pour le carbone biogénique sont calculés en fonction de la vitesse de captation et du stockage.

Ces facteurs de caractérisation ont pour vocation d'être utilisés en ACV statique en remplacement du facteur de caractérisation nul pour les émissions de CO₂ biogénique. Les séquestrations de CO₂ conservent leur facteur de caractérisation nul, leur effet étant déjà pris en compte dans le calcul des facteurs de caractérisation pour les émissions. Pour une biomasse avec une période de rotation rapide, le facteur de caractérisation calculé sera plus faible (car le carbone est séquestré plus rapidement) que

pour une biomasse avec un période plus longue, où le carbone reste plus longtemps dans l'atmosphère.

Par la suite, Guest, Cherubini, et al. (2013) ajoutent la prise en compte de l'effet du stockage temporaire dans les produits. D'autres auteurs ont raffiné le calcul des facteurs de caractérisation en fonction du type de produit (qui influence le temps de stockage) et la nature de la biomasse (qui influence les conditions de la croissance, et donc la vitesse de séquestration) (Gmünder et al., 2020; Holtsmark, 2015).

Cette approche comporte des limites. Notamment, elle permet de prendre en compte les effets du stockage et du délai entre séquestration et émission seulement pour les flux de CO₂ biogéniques, sans prendre en compte ces aspects pour les autres flux d'inventaire (contenant du carbone biogénique ou non) (Breton et al., 2018). Le calcul des facteurs de caractérisation mélange les étapes d'inventaire et de caractérisation des impacts traditionnellement bien séparées en ACV. De plus, elle repose sur l'hypothèse que l'ensemble du CO₂ émis sera recapté, ce qui n'est pas nécessairement vérifié (voir section 2.2.1). Finalement, elle comporte des difficultés opérationnelles (voir section 4.4.2).

2.3.2.5 Approches de comptabilisation dynamique

D'autres méthodes sont apparues autour des années 2010 pour tenir compte du stockage et des dynamiques des flux de GES et proposent un cadre dynamique beaucoup plus général permettant de calculer de manière dynamique les impacts de l'ensemble des flux d'inventaire ayant un impact sur les changements climatiques.

- **Approche Levasseur** (Levasseur, Lesage, & Margni, 2010). Cette méthode propose de tenir compte de l'aspect dynamique de l'inventaire en modélisant l'évolution de l'impact sur les changements climatiques en fonction du temps. Au niveau inventaire, les émissions GES sont distribuées dans le temps, puis des courbes des forçages radiatifs sont tracées pour chaque émission à chaque année. Le résultat obtenu est donc une courbe présentant l'évolution du forçage radiatif dans le temps (instantané). Le forçage radiatif cumulé peut ensuite être calculé en fonction du temps afin de comparer l'impact de différents scénarios (Levasseur & Brandao, 2014). Cette approche est équivalente à la méthode de Lashof, mais sans imposer d'horizon de temps fixe : les courbes étant tracées à l'infini, un utilisateur pourrait fixer son horizon temporel là où il le souhaite. Un horizon temporel placé à 100 ans donnerait les mêmes résultats que la méthode de Lashof. Cette méthode a été adaptée dans la réglementation environnementale française RE2020 sur la construction neuve pour le calcul de résultats dynamiques et dans le développement d'un protocole de crédits compensatoires pour les projets de reboisement dans le cadre marché règlementaire du carbone au Québec (SPEDE).

Les résultats dynamiques calculés avec cette méthode ont déjà été comparés avec des résultats statiques en utilisant un horizon temporel fixe. L'utilisation d'un horizon fixe permet de calculer le forçage radiatif cumulé au-delà duquel les émissions ne sont plus considérées (Levasseur, Lesage, & Margni, 2010). Dans ce cas, l'agrégation des émissions dynamiques résulterait, pour l'indicateur GWP, en un impact total plus faible que celui obtenu avec l'approche statique, puisqu'une partie des effets des émissions qui ont lieu vers la fin de l'horizon temps ne seraient pas comptabilisées.

- **Approche Ventura** : Cette première méthode a été critiquée par Ventura (2023), qui entend que l'horizon temporel de l'impact doit être le même pour toutes les substances émises tout au long du cycle de vie, et ce quel que soit le moment où la substance est émise (Figure 2-13). Dans ce cas, l'agrégation des résultats obtenus avec un horizon temporel fixe résulte en un résultat total, pour l'indicateur GWP, égal à celui de l'approche statique. Cependant, les courbes de forçage radiatif instantané changent en fonction du temps, ce qui rend discutable la comparaison entre des résultats dynamiques et statiques.

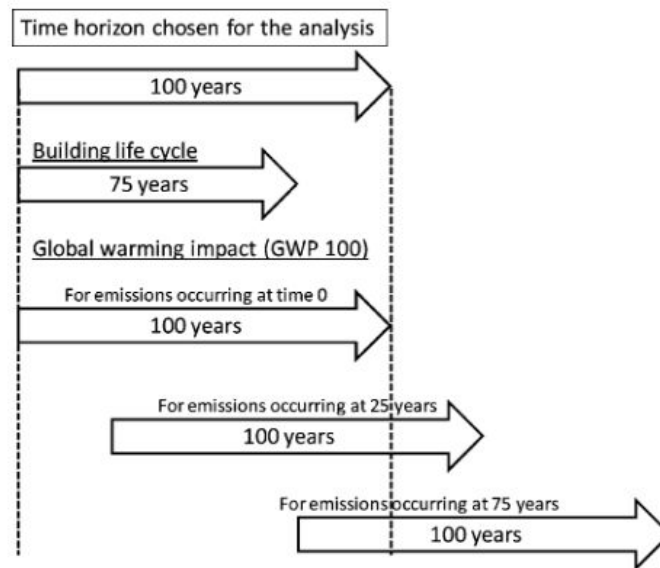


FIGURE 2. Illustration of the inconsistency in time frames for global warming LCIA with the example of a 75-year lifetime building.

Figure 2-13: Inconsistance des horizons temps considérés pour les changements climatiques avec l'exemple d'un bâtiment ayant une durée de vie de 75 ans (reproduit de Levasseur, Lesage, Margni, et al. (2010)).

En approche dynamique, modéliser la séquestration de carbone biogénique en avant ou après la récolte de la biomasse modifie les résultats obtenus. Dans l'étude de Albers et al. (2020), ces deux scénarios sont envisagés. Selon qu'une vision « historique » (on considère que la biomasse a séquestré le CO₂ biogénique en amont de la récolte) ou « future » (on considère que la biomasse qui va repousser après la récolte va capter le CO₂ biogénique) soit adoptée, l'hypothèse de neutralité carbone surestime ou sous-estime l'impact. Un arbre de décision est proposé dans l'article pour déterminer si une perspective « historique » ou « future » devrait être adoptée.

L'objectif des approches dynamiques est de modéliser l'évolution du forçage radiatif au cours du temps. Ainsi, elles prennent en compte à la fois l'effet du stockage temporaire et l'effet du délai entre séquestration et émission. Les résultats obtenus en ACV dynamique peuvent difficilement être comparés avec les résultats obtenus en ACV statique, car ils ne représentent pas les mêmes choses : l'ACV statique permet de calculer l'impact potentiel sur le changement climatique pour un horizon temporel donné, tandis que l'ACV dynamique permet de représenter l'évolution de l'impact sur le changement climatique au cours du temps. Les indicateurs dynamiques donnent une autre information que les indicateurs statiques, au même titre que plusieurs indicateurs permettent de mesurer l'impact sur les changements climatiques (voir section 2.1.4.4).

2.3.2.6 Analyse critique de la prise en compte de l'aspect temporel/dynamique et du stockage en ACV

Les méthodes de comptabilisation du stockage et de prise en compte de la dynamique des flux de carbone varient en fonction des éléments dynamiques considérés : parmi les méthodes dites dynamiques sélectives, les approches tonne.annee ne considèrent que la question du stockage tandis que la méthode GWPbio considère le stockage et la dynamique de croissance de la biomasse, mais seulement pour les flux de CO₂ biogéniques. Ces deux approches sont **hybrides avec l'ACV statiques et ne permettent pas de traiter l'ensemble des flux d'inventaire de façon cohérente**. Les approches de comptabilisation dynamique sont plus complètes, car l'ensemble de l'inventaire est dynamique et

l'impact de chaque flux est calculé de manière dynamique. Les résultats obtenus sont des **résultats complémentaires à ceux obtenus en approche statique**.

En pratique, les méthodes tonne.annee et GWPbio sont des méthodes complémentaires à combiner avec l'ACV statique (approche FC=0/0 ou FC=-1/+1 selon le cas), pour lesquelles un horizon temporel au-delà duquel les impacts ne sont plus considérés est défini. Ces approches visent principalement à donner un crédit environnemental au fait de garder hors de l'atmosphère du carbone pendant une période donnée. L'importance accordée aux impacts à court terme et au stockage devient plus importante avec un choix d'horizon temporel plus court (Levasseur, Brandão, et al., 2012). En revanche, **si l'horizon temporel considéré est infini, il n'y a aucun bénéfice à repousser une émission**.

Les approches dynamiques nécessitent souvent une modélisation avec des outils spécifiques autres que les logiciels d'ACV traditionnellement utilisés. Par exemple, l'outil dynCO₂ permet d'appliquer l'approche Levasseur. Ces méthodes ne fixent pas d'horizon temporel de l'impact et cherchent davantage à montrer **l'évolution des concentrations et du forçage radiatif au fil du temps, ce qui permet aussi d'identifier les pics d'impact à court terme et les déplacements d'émissions vers le futur**.

2.3.3 Usage et transformation des terres (LULUC)

2.3.3.1 Introduction

On désigne par **l'usage et la transformation des terres (en anglais, Land Use and Land Use Change, généralement abrégé par l'acronyme LULUC)** l'utilisation et la transformation d'espace naturel par les activités humaines, telles que l'agriculture, la foresterie, l'exploitation minière, la construction ou l'industrie. (Milà I Canals et al., 2007; Rosenbaum et al., 2017).

L'inclusion de ce type d'impact en ACV est un sujet qui a pris de plus en plus d'ampleur ces dernières années, notamment avec le développement de l'ACV pour les secteurs agricoles de la bioénergie. (Benoist & Bessou, 2018; Reinhard et al., 2017). Selon le GIEC, les flux liés à l'usage et la transformation des terres représentent entre 9% et 19% de l'ensemble des émissions de CO₂ anthropogéniques à l'échelle mondiale (Forster et al., 2023a). Leur prise en compte est donc cruciale en ACV. Bien que plusieurs modèles aient été développés, il n'existe pas à ce jour de consensus pour harmoniser et opérationnaliser ces méthodes (Benoist & Bessou, 2018). La première opérationnalisation de la méthode date de 2010 seulement, notamment dû au fait que les impacts dépendent fortement du contexte géographique et temporel, contrairement à d'autres catégories d'impact en ACV (Rosenbaum et al., 2017). Aujourd'hui, la prise en compte des LULUC en ACV est encore inaboutie.

Afin de discuter de la prise en compte des impacts des LULUC en ACV, il convient de bien définir les termes employés. Deux types d'intervention humaine sont à distinguer (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022) :

- **L'occupation des terres** (ou usage des terres) est le fait d'utiliser une surface de terre pour un certain usage (par exemple, un usage agricole) avec une certaine intensité reflétant des pratiques de gestion des terres (par exemple, l'agriculture intensive avec labourage, agriculture biologique sans labourage, exploitation d'une forêt aménagée avec retour au sol des résidus, etc.), et de maintenir cet usage et cette intensité pendant un certain temps (par exemple, maintenir une certaine culture pendant 20 ans).
- **Les changements d'utilisation des terres** (aussi appelé changement d'usage des sols ou transformation des terres ou Land Use Change, abrégé LUC) reflètent les **conséquences d'un**

changement de l'usage d'une terre et/ou de l'intensité de son usage. *Dans ce rapport, le terme changements d'utilisation des terres, ou LUC, désigne à la fois les changements d'affectation des terres et les changements de gestion des terres.*

- **Le changement d'affectation des terres** désigne le fait de convertir une terre d'un usage vers un autre (par exemple, convertir un pâturage en culture annuelle). La conversion d'une forêt vers un autre usage est appelée déforestation. La conversion d'une terre vers un autre usage peut avoir un effet positif ou négatif sur l'environnement.
- **Le changement de gestion des terres** est lié aux changements de pratiques agricoles ou forestières (par exemple, réduction/augmentation du travail du sol, de la quantité de résidus laissée au sol, coupe d'arbres plus jeunes, changement des essences cultivées, etc.). Dans ce cas, l'affectation (aussi appelé usage) de la terre reste la même, mais son intensité d'usage varie. Le changement de gestion d'une terre peut avoir un effet positif ou négatif sur l'environnement.
- La littérature mentionne également les effets directs et indirects des LUC: Les **LUC directs** (dLUC) désignent les LUC causés directement par les terres utilisées par le système de produit qui nous intéresse (p. ex. la culture de la biomasse utilise une terre qui était utilisée auparavant pour des pâturages et de la foresterie). Les **LUC indirects** (iLUC) désignent la chaîne de conséquences de LUC dû aux LUC directs via des mécanismes de marché (p. ex. la mise en culture d'un pâturage pour la biomasse a provoqué la conversion d'une forêt en pâturage ailleurs pour répondre à la demande en pâturage).

Ces définitions sont celles employées dans ce document. **Dans la littérature, les termes ne sont pas toujours employés pour désigner les mêmes choses : il est important de toujours consulter les définitions données dans le document consulté pour éviter toute confusion.**

2.3.3.2 Impacts environnementaux liés aux LULUC

L'occupation des terres et le changement d'utilisation des terres exercent une influence sur les changements climatiques, mais également sur de **nombreuses autres catégories d'impact en ACV.**

L'ensemble des mécanismes environnementaux/chaînes de cause à effet liant la transformation et l'utilisation des terres aux trois aires de protection identifiées en ACV (Santé humaine, Qualité des écosystèmes et Ressources naturelles) est complexe. La Figure 2-14 montre la chaîne de cause à effet liée aux LULUC.

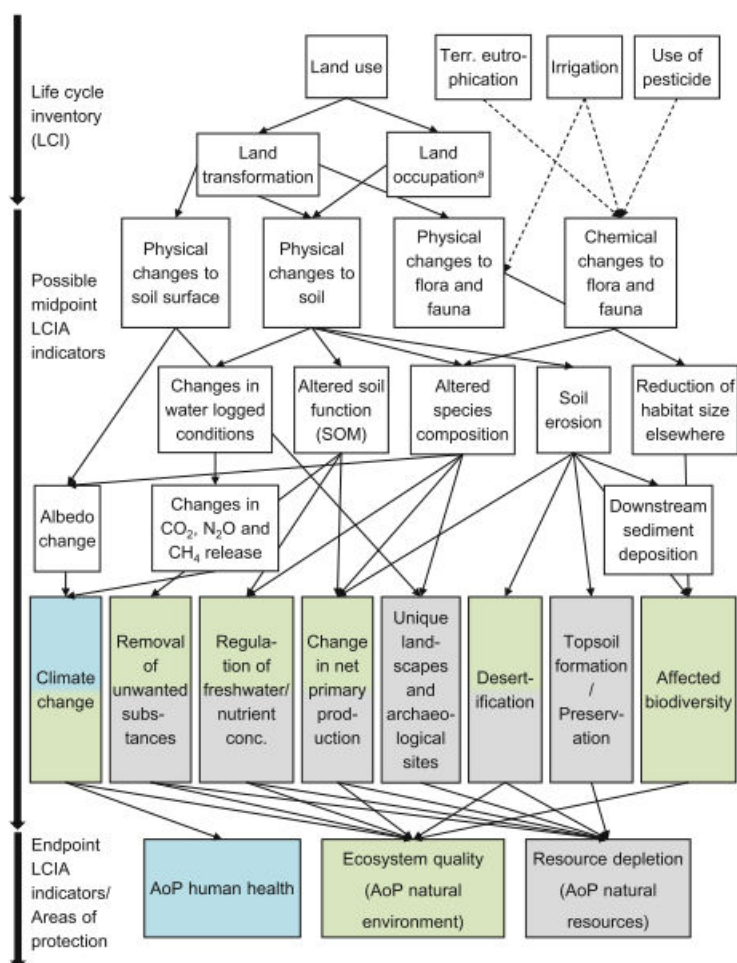


Figure 2-14 : Chaînes de cause à effet des LULUC en ACV (reproduit de (Rosenbaum et al., 2017)).

À l'heure actuelle, les modèles ne permettent pas de prendre en compte l'ensemble des impacts environnementaux liés aux LULUC. Dans le cadre développé par L'UNEP SETAC Life cycle initiative, il a été énoncé que la prise en compte des impacts des LULUC en ACV devrait au moins couvrir trois familles d'impact (Müller-Wenk & Brandão, 2010):

- les impacts sur les **changements climatiques** ;
- les impacts sur la **qualité des sols** ;
- les impacts sur la **biodiversité**.

Dans la suite de ce document, seuls les impacts sur les **changements climatiques** (et en conséquence sur l'acidification marine, voir Encadré 3 : Impacts sur l'acidification marine) seront abordés, car seul ce type d'impact est lié aux flux de carbone biogéniques. Pour plus de détail sur les impacts sur la qualité de sols et la biodiversité, se référer aux lignes directrices de la Life Cycle Initiative (UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2016, 2019).

2.3.3.3 Impacts des LULUC sur les changements climatiques en ACV

La biosphère constitue l'un des quatre réservoirs identifiés par le GIEC ayant des échanges de carbone

avec l'atmosphère (voir Figure 2-1). L'usage et la transformation des terres perturbent ces interactions et influencent les échanges entre la biosphère et l'atmosphère, et en conséquence ont un impact sur le climat. La Figure 2-15 montre les différentes interactions entre la biosphère et l'atmosphère déjà abordées dans le schéma en introduction.

Les flux de LULUC sont des flux d'origine anthropogénique. Ils comprennent :

- des **émissions** : perte de biomasse et de carbone du sol lors du défrichage ou de l'exploitation forestière, décomposition des produits récoltés, émissions dues au drainage et au brûlage des tourbières, dégradation, etc ;
- des **absorptions** : absorption de CO₂ par la végétation naturelle qui repousse après une récolte ou un abandon de l'agriculture, boisement, etc.

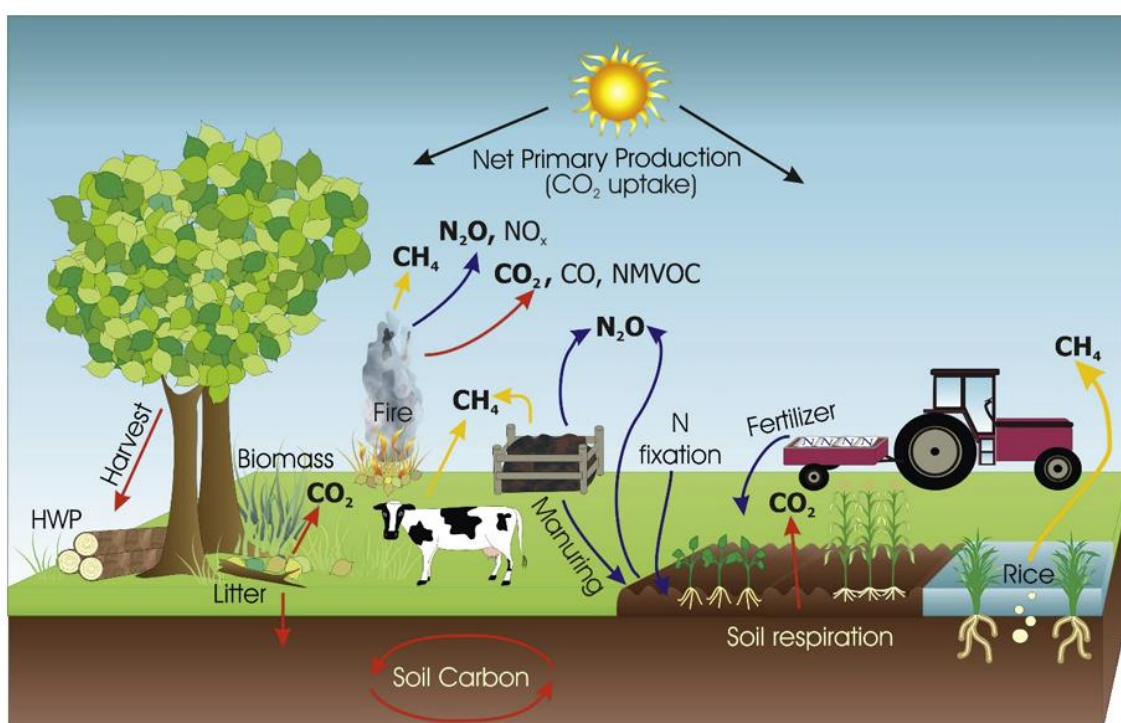


Figure 2-15 : Principaux GES absorbés et émis par les terres utilisées et transformées par l'homme (reproduit de Eggleston et al. (2019)).

2.3.3.4 Inventaire, modèles et méthodes de caractérisation

Le modèle de caractérisation des impacts associés à la contribution des LULUC aux changements climatiques est le modèle de caractérisation des changements climatiques, détaillé en Section 2.1.4.4. Ainsi, **l'enjeu est de calculer les flux d'inventaire liés à l'usage et la transformation des terres.**

En 2018, Benoist & Bessou ont établi une revue des méthodes qui relient les LULUC et les changements climatiques. De très nombreux modèles ont été identifiés, ne reposant pas tous sur les mêmes approches. En ACV, les méthodes pour quantifier les émissions sont dites *bottom-up* : le point de départ étant le flux élémentaire, et le modèle de caractérisation décrit les mécanismes qui lient le flux à l'impact environnemental au travers d'une chaîne de cause à effet. Cependant, les modèles qui quantifient les impacts des LULUC sont plutôt développés avec une approche *top-down* : ils sont basés sur des

observations empiriques qui ne permettent pas de toujours lier l'impact à la cause. Ainsi, ces modèles sont difficiles à intégrer à l'ACV (Levasseur et al., 2013; Rosenbaum et al., 2017; Wiloso et al., 2016).

La revue de Benoist et Bessou a identifié quatre familles de méthodes qui lient LULUC et changements climatiques. Seules les deux premières familles de méthodes, les plus utilisées en ACV, seront décrites plus en détail. Les quatre familles de méthodes sont :

- la méthode **IPCC Tier 1**, développée par le GIEC dans le cadre des inventaires de GES nationaux et toutes les méthodes dérivées ;
- la méthode de **Muller-Wenk et Brandao**, respectant les principes du cadre fixé par l'UNEP Life cycle initiative ;
- la méthode de **Benoist et Cornilier** qui est développée en lien avec l'ACV dynamique ;
- la méthode de **Schmidinger et Stehfest** qui est une méthode prospective (utilisant le modèle IMAGE).

2.3.3.4.1 Méthode IPCC Tier 1 (recommandée par le ILCD Handbook (2010))

Ce cadre, recommandé par le ILCD Handbook (2010), a inspiré plusieurs outils et réglementations : Renewable Energy Directive (2018), PAS 2050 (2011), Blonk tool, Mécanismes de développement propre (MDP), méthodologies du Verified Carbon Standards (VCS), outil EX-ACT de la FAO... (Benoist & Bessou, 2018; Levasseur & Brandão, 2013). Les facteurs du GIEC sont notamment ceux utilisés dans la base de données *ecoinvent* (Reinhard et al., 2017). La section 4.5.1 décrit plus en détail comment les LULUC sont implémentés dans *ecoinvent*. La méthode IPCC Tier 1 permet d'estimer les émissions de carbone à l'échelle d'un pays en calculant les différences de stock de carbone entre l'état de la terre avant la transformation et l'état de la terre après la transformation, amorties sur 20 ans. Cette méthode ne prend en compte **que le changement d'utilisation des terres, et non l'occupation des terres**. C'est la méthode qui est la plus employée au sein des pratiques ACV à ce jour, notamment car des facteurs d'émission sont donnés par défaut, ce qui rend la méthode relativement facile à mettre en place.

En 2006, le GIEC publie des lignes directrices pour calculer des inventaires de GES à l'échelle d'un pays (IPCC, 2006). Le GIEC sépare les émissions selon différents secteurs, dont le secteur Agriculture, Forêt et Autres Usages des Terres (en anglais *Agriculture, Forest and Other Land Uses* (AFOLU)). Les émissions de GES du secteur AFOLU sont estimées en quantifiant le **changement de la quantité de carbone stockée** du réservoir biomasse par rapport à un **stock d'équilibre**. Le GIEC échelonne sa méthode en trois niveaux selon les données d'inventaire disponibles pour le calcul : de Tier 1 à Tier 3. C'est la méthode Tier 1, celle qui nécessite le moins de données, qui est la plus utilisée et détaillée ci-après. Deux approches sont proposées :

- la méthode dite **gain-loss** permettant de calculer les variations annuelles de carbone dans chaque réservoir (Eggleston et al., 2019) (voir chapitre 2, équation 2.4) ;
- la méthode dite **stock-difference** permettant de calculer la différence de stock entre deux états à deux moments différents (Eggleston et al., 2019) (voir chapitre 2, équation 2.5). C'est la méthode la plus employée en ACV.

La méthode Tier 1 divise la biosphère en cinq compartiments pouvant stocker du carbone : biomasse aérienne, biomasse souterraine, le bois mort, la litière (feuilles mortes...) et la matière organique du sol. La Figure 2-16 détaille les compartiments considérés et les flux entre ces compartiments. Au niveau Tier 1, les compartiments de bois mort et de litière sont souvent regroupés sous l'appellation "matière organique morte". Le changement de stock de carbone total est la somme du changement de stock de carbone des cinq compartiments.

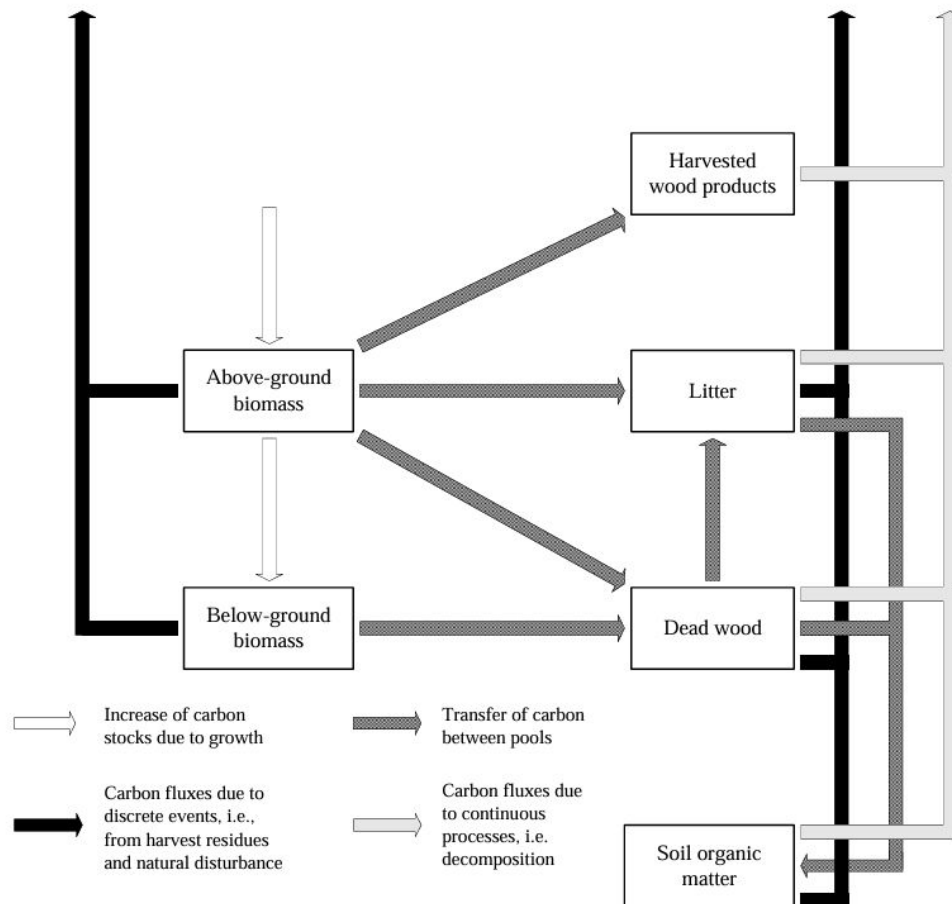


Figure 2-16 Cycle du carbone généralisé de l'écosystème AFOLU montrant les flux de carbone entrants et sortants du système et entre les cinq compartiments de carbone (reproduit de Eggleston et al. (2019)).

Les émissions de GES correspondent à un changement d'utilisation des terres à un moment précis dans le temps. Des facteurs par défaut sont donnés pour déterminer la valeur des émissions liées au changement d'utilisation des terres en fonction de plusieurs paramètres (surface de terre, type d'usage de la terre, localisation géographique...).

Cet impact est ensuite amorti dans le temps, et chaque activité qui utilise cette terre se voit attribuer une partie de l'impact de cette transformation. La manière de répartir la responsabilité de l'impact sur les activités ultérieures diffère selon les normes (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022):

- La méthode Tier 1 recommande par défaut une période d'amortissement de 20 ans avec un **amortissement uniforme** sur ces 20 ans : une activité qui utilise la terre pendant une année dans la période des 20 ans après la transformation se verra attribuer 1/20^{ième} de l'impact. Pour les cultures ayant des rotations plus longues que 20 ans comme la sylviculture, une période d'amortissement plus longue correspondant à la durée de rotation de la culture peut être considérée. D'autres solutions en termes de répartition peuvent également être proposées par les pays. Cette approche a tendance à sous-estimer les impacts liés à une déforestation directe, car, arithmétiquement, l'activité ayant généré la déforestation ne se verra allouer qu'une part des impacts si elle ne perdure pas 20 ans.

- ILCD Handbook, dont les recommandations sont basées sur le GIEC, recommande cependant par défaut d'appliquer un **amortissement linéaire dégressif** sur 20 ans donnant plus de poids aux impacts des transformations récentes. Le ILCD Handbook propose également d'utiliser une période d'amortissement représentant le temps nécessaire pour atteindre 90 % de la variation théorique de stocks de carbone des sols.

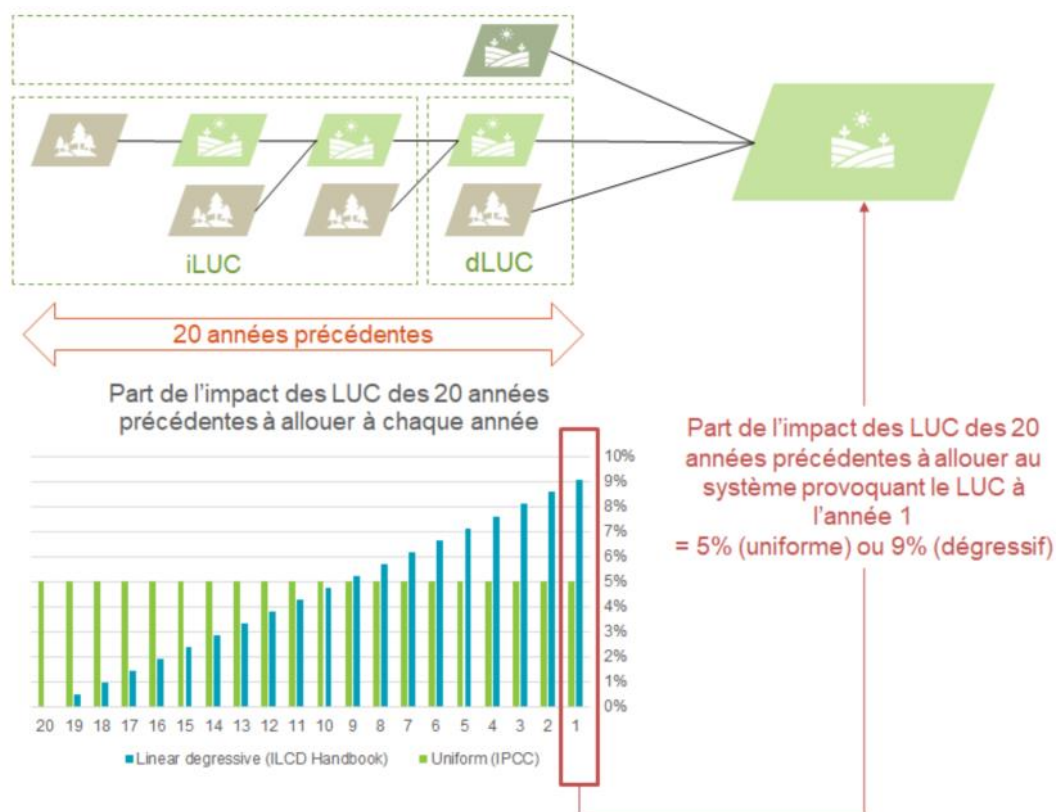


Figure 2-17 : Illustration de l'allocation temporelle des impacts des LUC selon un amortissement uniforme ou linéaire dégressif (reproduit de (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022)).

Pour appliquer cette méthode, le praticien ACV calcule les émissions de GES avec les équations et données fournies par le GIEC, alloue la part de ces émissions à son processus en fonction de l'amortissement, puis les intègre à son inventaire. Une fois intégrées à l'inventaire, ces émissions sont traitées comme n'importe quel autre flux et caractérisées avec la méthode de caractérisation du choix du praticien.

2.3.3.4.2 Müller-Wenk et Brandão

Face aux recommandations du GIEC et du ILCD Handbook (2010), les recommandations de l'UNEP-SETAC constituent une approche divergente pour la pratique de l'ACV. Ce cadre est construit sur l'approche de Koellner et al. (2013) qui donne un cadre commun pour le calcul des impacts pour toutes les catégories d'impact environnemental influencées par les LULUC. Dans cette approche :

- un impact **d'occupation** des terres est caractérisé, traduisant le fait que la mobilisation d'un sol pour une activité anthropique maintient la qualité de celui-ci à un niveau donné et retarde le retour de cette qualité vers un certain **niveau de référence**, ce qui constitue alors un impact à considérer ;

- la caractérisation des impacts de **transformation** intègre des éléments de dynamique, à travers la régénération vers un **usage de référence** (inclusion du temps d'occupation et d'un temps de régénération des écosystèmes vers l'état de référence).

L'usage de référence est défini comme la « Végétation Naturelle Potentielle », c'est-à-dire l'état hypothétique de la terre sans l'activité humaine. La définition de cet usage de référence constitue actuellement un sujet de controverse dans la littérature scientifique (Benoist & Bessou, 2018). Cette méthode permet de calculer des facteurs de caractérisation pour l'occupation et la transformation des terres, qui sont directement multipliés par les données d'inventaire (surface occupée, temps d'occupation, type d'usage de la terre occupée pour les FC d'occupation, et surface transformée et type d'usage pour les FC de transformation). La Figure 2-18 résume l'approche à l'aide d'un graphique.

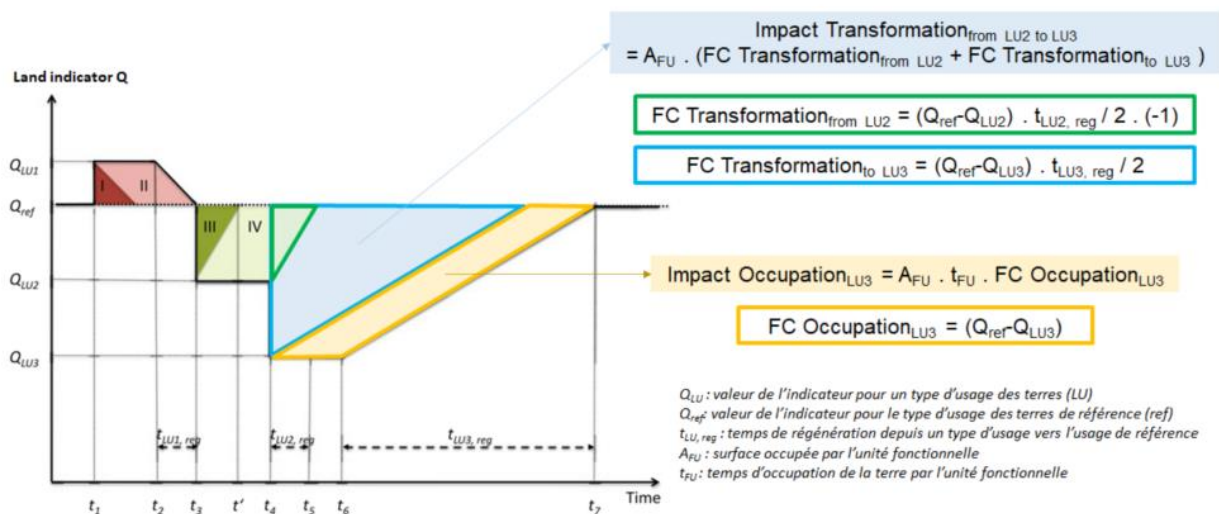


Figure 2-18 : Calcul des facteurs de caractérisation (FC) et impacts de l'usage et la transformation des terres pour un problème environnemental Q. (reproduit de (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022)).

FC transformation_{to LUC} indique une transformation des terres depuis son usage de référence vers un autre type d'usage. Inversement, FC transformation_{from LUC} indique une transformation des terres depuis un type d'usage vers son usage de référence.

2.3.3.4.3 Recommandations générales sur la méthode à adopter

Au cours du projet SOCLE de l'ADEME, les deux méthodes ont été testées sur une étude de cas. Leurs recommandations sont les suivantes (Bessou et al., 2018):

- toujours prendre en compte les impacts du changement d'utilisation des terres (incluant le changement d'affectation des terres et le changement de gestion des terres) pour l'évaluation de l'impact sur le changement climatique ;
- prioriser l'utilisation de données de terrain ou une modélisation lorsque c'est possible, plutôt que l'utilisation des valeurs par défaut proposées par les méthodes existantes ;
- faire des analyses de sensibilité sur les facteurs clés tels que le choix de l'état de référence,
- utiliser les méthodes recommandées : au moins la méthode IPCC Tier 1 (avec une répartition de l'impact dans le temps dégressive), la méthode Müller-Wenk et Brandão si possible.

3. État de l'art des exigences et pratiques de comptabilisation du carbone biogénique

3.1 État de l'art des exigences réglementaires et normatives

Le Tableau 3-1 donne une vue d'ensemble des exigences réglementaires et normatives et du positionnement des acteurs publics et privés relatifs à la comptabilisation des GES biogéniques. Un tableau plus détaillé par norme et par enjeu est disponible en Annexe 1.

Tableau 3-1 : Tableau synthétisant les exigences réglementaires et normatives et du positionnement des acteurs publics et privés pour a comptabilisation des GES biogéniques

Enjeux	Réponse des normes
<p>Approche de comptabilisation</p> <hr/> <p>Inventaire</p> <hr/> <p>Méthode de caractérisation</p>	<p>Suivi souvent obligatoire des flux de carbone biogénique. Nomenclature : flux explicitement identifié par "biogénique" dans son nom. Dans les Product Category Rule (PCR), il est souvent demandé de faire le suivi des flux de carbone biogénique entre les modules (EN 15 804 et PCRs dérivés).</p> <p>Approche FC=0/0 : obligatoire dans le PEF (2018) (facteur ajusté pour le CH₄, sauf contre-indication par un PCR), parfois possible (par exemple dans le ILCD Handbook (2010) qui ne donne pas de méthode spécifique à suivre).</p> <p>Approche FC=-1/+1 : généralement recommandée (GHG Protocol (2011), PAS 2050 (2011), EN 15804+A2 (2019), EN16485, EN 16760, ISO 14067 (2018)...).</p>
<p>Multifonctionnalité</p> <hr/> <p>Hiérarchie générale</p> <hr/> <p>Spécifique aux flux de carbone</p>	<p>En général, hiérarchie ISO 14040-44.</p> <p>En général, le carbone biogénique doit être alloué selon la réalité des flux physiques indépendamment du choix d'allocation.</p>
<p>Aspect temporel/dynamique et stockage</p> <hr/> <p>ACV dynamique</p> <hr/> <p>Stockage</p>	<p>Non mentionnée sauf dans ISO 14 067, méthode générale proposée pour prendre en compte les aspects temporels</p> <p>• Stockage temporaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ne pas le prendre en compte (EN 15804+A2 (2019), PEF (2018)) - Ne pas prendre en compte sauf si spécifié dans les objectifs de l'étude (ILCD Handbook (2010)) - Possibilité de le calculer, mais à déclarer à part (ISO 14 067, GHG Protocol (2011)) - À prendre en compte (PAS 2050 (2011)) <p>Si pris en compte, les méthodes pour le calcul sont :</p>

Enjeux		Réponse des normes
		<ul style="list-style-type: none"> - Méthode de Lashof simplifiée (ILCD Handbook (2010), EN 16760) - Facteur multiplicatif (PAS 2050 (2011)) - Méthode Levasseur simplifiée (RE2020) • Stockage permanent : - Non considéré (ISO 14067 (2018), EN 15 804) - Pris en compte (carbone considéré stocké indéfiniment si émission après 100 ans) (PEF (2018), PAS 2050 (2011))
Usage et transformation des terres (LULUC)	dLUC	<p>À inclure dans le bilan pour toutes les normes et guidelines, mais parfois à déclarer séparément</p> <ul style="list-style-type: none"> - Souvent, amortissement de 20 ans et méthode IPCC Tier 1 pour le calcul des émissions (PAS 2050 (2011), PEF (2018)) - Méthode Müller-Wenk et Brandão (ILCD Handbook (2010)) <p>Les LULUC à partir des forêts anciennes sont parfois comptabilisés comme des émissions fossiles</p> <p>Les stockages de carbone liés aux dLUC sont considérés à inclure</p>
	iLUC	<p>Non considérés en général, dû au manque de consensus pour les calculer</p> <p>Le ILCD Handbook (2010) permet sa quantification si l'objectif de l'étude le justifie (approche conséquentielle)</p>

3.2 État de l'art des praticiens (bases de données et logiciels)

Les principales bases de données d'Inventaire du cycle de Vie (ICV) ont été analysées pour comprendre leur traitement des enjeux liés au carbone biogénique. Le Tableau 3-2 présente le résumé des approches utilisées par les différentes bases de données d'ICV pour les différents enjeux étudiés et le Tableau 3-3 pour les méthodes de caractérisation.

Tableau 3-2: Tableau comparatif du traitement des enjeux étudiés par les principales bases de données d'ACV

Base de données	Inventaire des flux de GES biogéniques	Multifonctionnalité	Usage et transformation des terres (LULUC)
<i>ecoinvent*</i>	Tous les flux inclus Contenu en carbone comme information supplémentaire	Allocation « économique » + cut-off Autres versions disponibles	dLUC : processus séparés ou émissions incorporées

Base de données	Inventaire des flux de GES biogéniques	Multifonctionnalité	Usage et transformation des terres (LULUC)
Base Carbone (ADEME) (en cours de refonte)	Les flux de CO ₂ biogénique et de CH ₄ biogénique sont inclus La Base Carbone permet de calculer directement des impacts et applique l'approche FC=0/0	Allocation dépend du processus	dLUC inclus (UTCF = Utilisation des Terres, leurs Changements et la Forêt) Facteurs d'émission par défaut provenant de l'étude de Pellerin Sylvain et al. (2019)
Agribalyse	Tous les flux inclus	Variable selon processus	dLUc : adapté d'ecoinvent
Agri-footprint	Les flux de CO ₂ biogéniques séquestrés et émis ne sont pas inclus Les flux de CH ₄ biogéniques sont inclus Les flux de GES liés aux LULUC sont inclus	3 versions : massique, économique, énergétique	dLUC : calculé avec l'outil « LUC Impact Tool » et intégré dans les processus
GaBi	Tous les flux inclus	Variable selon processus	dLUC inclus : calculé suivant les la méthode IPCC
USLCI	Tous les flux inclus	Massique/économique + cut-off	dLUC non inclus

*une explication plus détaillée de la comptabilisation du carbone biogénique dans ecoinvent est disponible dans la section 4. Étude de cas.

En général les bases de données incluent tous les flux de carbone biogénique tant de captage que d'émission et considèrent les émissions issues des LUC. Agri-footprint utilise l'hypothèse de la neutralité carbone pour justifier l'absence de la captation et les émissions de CO₂ biogénique. Les aspects temporels et de stockage ne sont pas directement traités par les bases de données, d'où l'exclusion du tableau. Néanmoins, certaines bases de données (GaBi, *ecoinvent*) affirment que l'inclusion de tout le bilan carbone peut permettre la considération du stockage (Sphera, 2022).

La principale différence entre les bases de données vient de la façon de traiter la multifonctionnalité. Certaines bases de données comme *ecoinvent* ou Agri-footprint présentent plusieurs versions en fonction du type d'allocation et du traitement de la fin de vie, tandis que d'autres ne présentent aucune option. Une des caractéristiques d'*ecoinvent* et de GaBi est la présence de flux de correction de carbone, qui permettent d'ajuster la quantité de carbone biogénique présent dans un processus à la suite d'une allocation non massique. Cette caractéristique permet de suivre les flux de carbone biogénique plus précisément, comme recommandé dans différents standards et normes (Tableau 3-1). Plus de détail sur l'allocation dans *ecoinvent* est disponible section 4.3.578.

Tableau 3-3 : Tableau comparatif du traitement des enjeux étudiés par les principales bases de données d'ACV

Méthode	Approche de comptabilisation	Catégories	Aspect temporel/dynamique et stockage
IPCC*	FC=0/0 ou FC=-1/+1 dLUC : +1	GWP100 (total, biogenic, fossil, land use) GTP100, GTP50, GWP20, GWP500...	n.a.
EF	FC=0/0 dLUC : +1	GWP100 (total, biogenic, fossil, land use)	n.a.
ReCiPe	FC=0/0 dLUC : +1	GWP100 total DALY species.yr	n.a.
IMPACT World+	FC=0/0 dLUC : +1	GWP100 total GTP100 total DALY PDF.m ² .yr	n.a.
LC-Impact	FC=0/0 dLUC : +1	DALY PDF.m ² .yr	n.a.

*une explication plus détaillée de la comptabilisation du carbone biogénique avec la méthode IPCC est disponible dans la section 4. Étude de cas.

3.3 Évolution des approches et enjeux

Plusieurs projets sur la comptabilisation du carbone biogénique sont en cours.

- La **Life Cycle Initiative** a débuté en 2023 un projet sur le carbone biogénique dont l'objectif est d'élaborer des recommandations qui apporte l'harmonisation et une crédibilité accrue des résultats d'ACVs pour les produits alimentaires et autres produits biosourcés. Ce projet est dirigé par des chercheurs de l'Université de Bath et impliquera de nombreuses parties prenantes participant à des groupes de travail sur des enjeux ciblés, et à un comité avisé technique qui supervise le projet. Les recommandations seront publiées sous la forme d'un livre blanc début 2025. Il est attendu que ces recommandations aient une portée et un impact international en mettant à la disposition des décideurs des informations cohérentes et consensuelles sur l'impact des produits biosourcés sur le climat³.

³ Plus de détails à <https://www.lifecycleinitiative.org/activities/life-cycle-assessment-data-and-methods/biogenic-carbon/>

- Le **Joint Research Center de la Commission Européenne** est actuellement en train de revoir la comptabilisation du carbone (biogénique) dans le cadre du PEF (2018). Des résultats préliminaires sont attendus à l'été 2024 et une publication d'ici la fin de l'année 2024.⁴

D'autres initiatives en lien avec les produits biosourcés ont été développées les dernières années en Europe :

- Le **projet ALIGNED**, financé par l'Union Européenne, est une collaboration entre l'industrie avec une forte présence de produits biosourcés (construction, bois, textile, pâte et papier et produits chimiques biosourcés) et des experts en ACV qui vise à développer un cadre méthodologique harmonisé pour produire des ACV.⁵
- Le **projet StarProbio**, financé aussi par l'Union Européenne entre 2017 et 2020, cherchait à traiter les enjeux environnementaux et sociaux liés aux produits biosourcés. Pour l'ACV les objectifs spécifiques étaient d'identifier les lacunes actuelles en termes d'indicateurs, d'exigences et de critères de durabilité et, par la suite, développer une approche cohérente et harmonisée pour l'analyse du cycle de vie environnementale, sociale et économique des produits biosourcés. D'autres objectifs spécifiques incluaient le développement d'une approche permettant d'identifier et d'atténuer le risque de changements indirects l'utilisation des terres.⁶

⁴ Les documents de travail du Technical Advisory Board, où sont discutés les derniers avancements sur le sujet, sont disponibles au lien suivant : <https://ec.europa.eu/transparency/expert-groups-register/screen/expert-groups/consult?lang=en&do=groupDetail.groupDetail&groupID=3710>

⁵ Plusieurs documents de travail sont disponibles, traitant les enjeux d'inventaire, la modélisation dynamique, les impacts et proposant des outils de modélisation : <https://alignedproject.eu/documents/>

⁶ Plusieurs livrables sont disponibles : <http://www.star-probio.eu/research/>

4. Étude de cas

L'objectif de cette étude de cas est de **décrire la façon dont les enjeux précédemment soulevés sont opérationnalisés dans une base de données et un logiciel ACV**. Dans ce cas d'étude, différents matériaux utilisés pour la construction d'un bâtiment (béton, bois et bambou) sont comparés. L'étude de cas est réalisée avec le logiciel SimaPro et la base de données *ecoinvent* version 3.9.1, car ce sont le logiciel et la base de données les plus couramment utilisés en ACV. La base de données *ecoinvent* a également été choisie pour sa transparence qui permet une étude approfondie des flux de carbone au sein du système modélisé. Pour plus d'information sur la façon dont le carbone biogénique est traité dans d'autres bases de données, se référer à la section 3.2.

4.1 Description générale de l'étude de cas

4.1.1 Description du système à l'étude

L'étude de cas reprend en grande partie la modélisation de l'article de Carcassi et al. (2022). L'objectif est de comparer les performances environnementales d'un bâtiment en faisant varier la nature des matériaux qui le composent.

Dans l'article de Carcassi et al. (2022), plusieurs typologies de bâtiment sont modélisées. La présente étude de cas se focalise sur le bâtiment de type « maison familiale individuelle » (*single family house* (SFH)). L'édifice comporte deux étages et sa superficie est de 145m². Il est décomposé en six éléments :

- les fondations, élément de structure sur lequel repose l'ensemble de la construction ;
- la membrane d'imperméabilisation des fondations ;
- la structure aérienne, qui constitue la structure des murs et du toit de l'édifice ;
- les fenêtres ;
- la finition, qui englobe le revêtement intérieur et extérieur (murs et plafonds).

L'isolation est considérée dans l'étude initiale, mais afin de simplifier l'étude de cas, **elle n'est pas incluse dans notre système de produit**.

Trois scénarios sont comparés :

- une maison **majoritairement composée de béton**, qui ne comporte pas de matériau biosourcé (scénario Béton) ;
- une seconde **de bois**, produit biosourcé avec temps de croissance long (scénario Bois) ;
- une troisième **de bambou**, matériau biosourcé avec un temps de croissance court (scénario Bambou).

Le scénario Béton constitue le scénario de référence fossile, auquel sont comparés deux scénarios biosourcés. Le bois et le bambou ayant des périodes de rotation différentes, les scénarios Bois et Bambou ont été choisis pour illustrer l'influence de la période de rotation notamment en approche de comptabilisation dynamique. Les fondations sont en béton armé pour les trois bâtiments. Le schéma suivant détaille la composition des différents éléments de l'édifice pour chaque scénario :

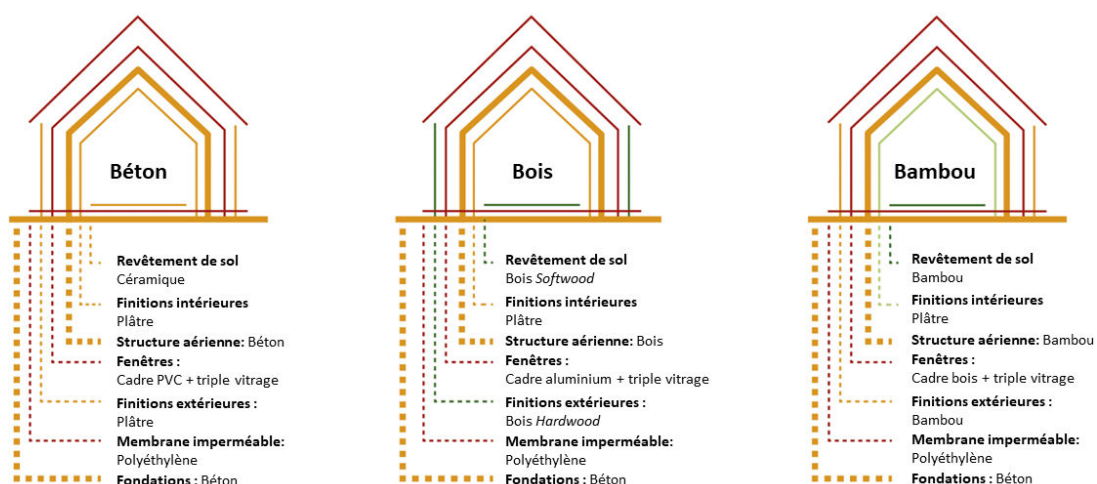


Figure 4-1 : Schéma représentant les trois systèmes à l'étude (reproduit depuis Carcassi et al. (2022)).

L'unité fonctionnelle choisie pour l'étude de cas est la suivante :

« Assurer un espace de vie à une famille dans une maison individuelle unifamiliale de 145 m² pendant la durée de vie utile du bâtiment (60 ans), construite en France en 2022. »

Les frontières du système incluent les étapes de construction, d'usage, le remplacement de certains éléments et la fin de vie du bâtiment (voir Figure 4-2).

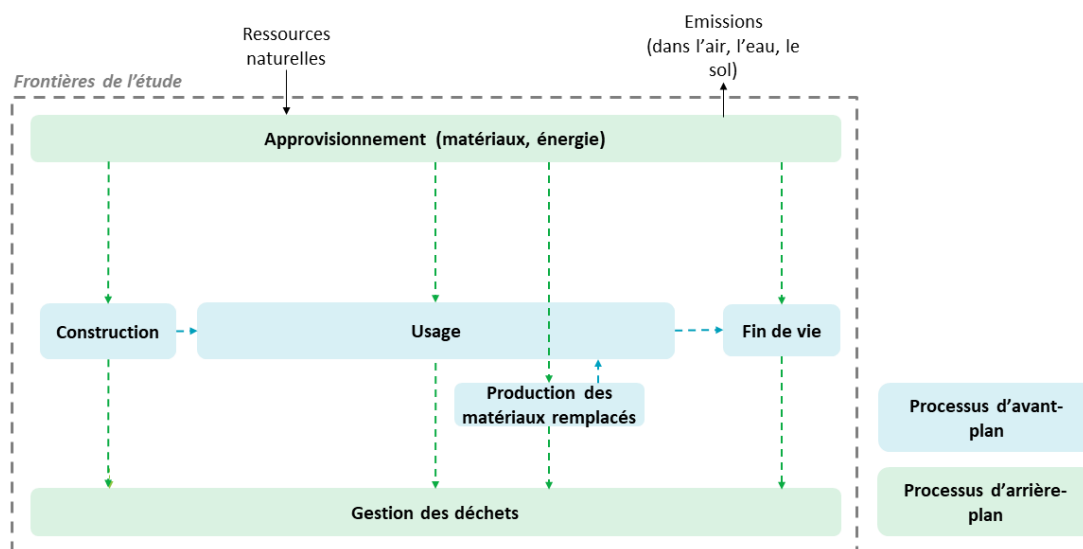


Figure 4-2 : Système de produit général comportant les principales étapes du cycle de vie du bâtiment.

Le paragraphe suivant résume brièvement les hypothèses qui sont faites pour chaque étape du cycle de vie :

- **Étape de construction:** Elle comprend uniquement les quantités de matériaux nécessaires pour chaque partie du bâtiment et n'inclut pas l'énergie nécessaire pour construire. Pour chaque édifice, la quantité de matériaux nécessaires est calculée en prenant en compte les dimensions

et des propriétés structurelles des matériaux choisis (béton, bois ou bambou). Aucune perte lors de la phase de construction n'est considérée.

- **Étape d'utilisation** : L'étape d'utilisation du bâtiment modélise la consommation d'énergie liée au chauffage. La quantité d'énergie consommée est considérée comme égale pour chaque maison, avec une consommation de 70 kWh.m⁻².année⁻¹. Le chauffage est supposé électrique, avec l'utilisation du mix électrique français de 2022 sur la durée de vie complète du bâtiment (aucun élément prospectif n'est inclus, car hors de l'intérêt de l'étude de cas).
- **Étape de remplacement**: La durée de vie de l'édifice est fixée à 60 ans. Cependant, certains éléments composant l'édifice ont une durée de vie plus courte et doivent être remplacés (Tableau 4-1). En ACV statique, la production et la fin de vie des éléments ayant une durée de vie de 30 ans sont donc doublées pour couvrir les 60 ans d'utilisation du bâtiment.
- **Étape de fin de vie** : Contrairement au choix qui ont été faits dans l'article, les matériaux composant les bâtiments sont traités en fin de vie avec les processus de marché de la base de données *ecoinvent* correspondant à la répartition des filières de traitement de ces déchets en France.

Tableau 4-1 : Liste des éléments de construction et leur durée de vie correspondante

Élément	Durée de vie
Fondations	60 ans
Structure aérienne	60 ans
Fenêtres	30 ans
Membrane d'imperméabilisation	60 ans
Finitions	30 ans

4.1.2 Description des approches testées

Trois des quatre approches de comptabilisation du carbone biogénique décrites dans la section 2.2 sont testées dans cette étude de cas. L'approche **Inventaire = 0/0** n'est pas testée dans l'étude de cas, car est considérée moins pertinente : l'ensemble des normes recommande à minima un suivi des flux de carbone biogéniques (voir section 3.1). Afin de les mettre en place, l'inventaire du cycle de vie reste inchangé, mais la méthode de caractérisation est modifiée.

- L'approche **FC=0/0** est mise en place pour établir un scénario de référence, car elle est l'approche la plus souvent adoptée dans les méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie (EICV) actuelle. La méthode de caractérisation choisie pour mettre en place l'approche FC=0/0 est la méthode *IPCC 2021 GWP100 (without CO₂ uptake)* disponible parmi les méthodes par défaut dans le logiciel Simapro. Les facteurs de caractérisation utilisés pour cette approche ainsi que les flux d'inventaire concernés sont résumés dans le Tableau 4-2. Cette méthode comporte trois indicateurs *GWP100 -fossil*, *GWP100 – biogenic* et *GWP100 – LULUC*. À noter que le monoxyde de carbone (CO) (biogénique ou fossile) n'est pas caractérisé dans cette méthode. Les résultats obtenus avec cette approche sont donnés dans la section 4.2.
- L'approche **FC=-1/+1**. Cette approche a été mise en place en choisissant une autre version de la méthode *IPCC 2021 GWP100* disponible dans le logiciel Simapro, dans laquelle l'absorption de CO₂ est prise en compte (méthode *GWP100 with CO₂ uptake*) (voir Tableau 4-2). Par rapport à la méthode de caractérisation *GWP100 without CO₂ uptake*, une partie des flux qui contribuaient à la catégorie *GWP100 – biogenic* contribuent dans cette version à une nouvelle catégorie d'impact : *GWP100 – CO₂ uptake*. Ainsi, il est possible de voir **les contributions des émissions de GES biogénique séparément des contributions de la séquestration du carbone biogénique** et du flux de correction de carbone. Les résultats de cette approche sont donnés dans la section 4.3 .
- L'approche **dynamique** : plusieurs approches dynamiques sélectives et dynamiques sont mises en place : une approche tonne.année (simplification de la méthode de Lashof proposée par le ILCD Handbook (2010)), l'approche GWPbio et une approche dynamique (Levasseur). Les résultats obtenus avec ces approches sont donnés dans la section 4.4.

4.1.3 Flux élémentaires et facteurs de caractérisation d'intérêt

Une attention particulière sera portée aux **flux élémentaires** qui contribuent aux indicateurs biogéniques des méthodes sélectionnées (Notation : [compartiment] Nom du flux dans ecoinvent / Simapro (si différent)) :

- **[Air] Carbon dioxide, biogenic** : modélise l'émission de CO₂ biogénique dans l'atmosphère, en kg de CO₂. Dans la base de données *ecoinvent*, sa valeur est calculée de manière différente selon le processus concerné, et des commentaires sont généralement disponibles pour connaître la façon dont elle est calculée.
- **[Air] Methane, biogenic** : modélise l'émission de CH₄ biogénique dans l'atmosphère, en kilogramme de CH₄. Dans la base de données *ecoinvent*, sa valeur est calculée de manière différente selon le processus concerné, et des commentaires sont généralement disponibles pour connaître la façon dont elle est calculée.
- **[Raw] Carbon dioxide, in air** : modélise la séquestration de CO₂ biogénique de l'atmosphère par la biomasse, en kilogramme de CO₂. Dans la base de données *ecoinvent*, sa valeur est généralement calculée à partir du contenu en carbone biogénique du produit, multiplié par un ratio stœchiométrique pour obtenir la quantité de CO₂ séquestrée à l'origine de ce carbone.
- **[Raw] Carbon dioxide, non-fossil, resource correction** : flux ajouté dans la base de données *ecoinvent* pour équilibrer le bilan de carbone à l'échelle d'un processus après une allocation.

La section 4.3.5 détaille la méthode de calcul et l'influence de l'ajout de ce flux sur le système.

- **[Air] Carbon dioxide, from soil or biomass stock (nom donné dans *ecoinvent*)**, aussi appelé **Carbon dioxide, land transformation (nom donné dans SimaPro)** : modélise les émissions de CO₂ biogéniques dans l'atmosphère provenant de l'usage et de la transformation des terres, calculées en kilogramme de CO₂.
- **[Soil] Carbon dioxide, to soil or biomass stock** : modélise les émissions ou absorptions du carbone biogénique par le compartiment sol, en kilogramme de CO₂.
- **[Air] Methane, from soil or biomass stock (nom donné dans *ecoinvent*)**, aussi appelé **Methane, land transformation (nom donné dans SimaPro)** : modélise les émissions de CH₄ biogénique dans l'atmosphère provenant de l'usage et de la transformation des terres, en kilogramme de CH₄.

Tableau 4-2 : Catégories d'impact et facteurs de caractérisation (FC) des méthodes IPCC GWP100 avec et sans la considération du CO₂ biogénique

Sous-indicateur	Flux d'inventaire Notation : [compartiment] Nom du flux dans ecoinvent / Simapro (si différent)	Approche FC=0/0, facteurs de caractérisation (kg CO ₂ -éq / kg)	Approche FC=-1/+1, facteurs de caractérisation (kg CO ₂ -éq / kg)
GWP100 – fossil	[Air] Carbon dioxide, fossil	1	1
	[Air] Methane	29.8	29.8
	Toutes les autres émissions de GES fossiles	FC fossiles	FC fossiles
GWP100 – biogenic	[Air] Carbon dioxide, biogenic	0	1
	[Air] Methane, biogenic	27	29.8
GWP100 – CO ₂ uptake	[Raw] Carbon dioxide, in air	0	-1
	[Raw] Carbon dioxide, non-fossil, resource correction	0	-1
GWP100 - land transformation	[Air] Carbon dioxide, from soil or biomass stock / Carbon dioxide, land transformation	1	1
	[Soil] Carbon dioxide, to soil or biomass stock	-1	-1
	[Air] Methane, from soil or biomass stock / Methane, land transformation	29.8	29.8

4.2 Application de l'approche FC=0/0

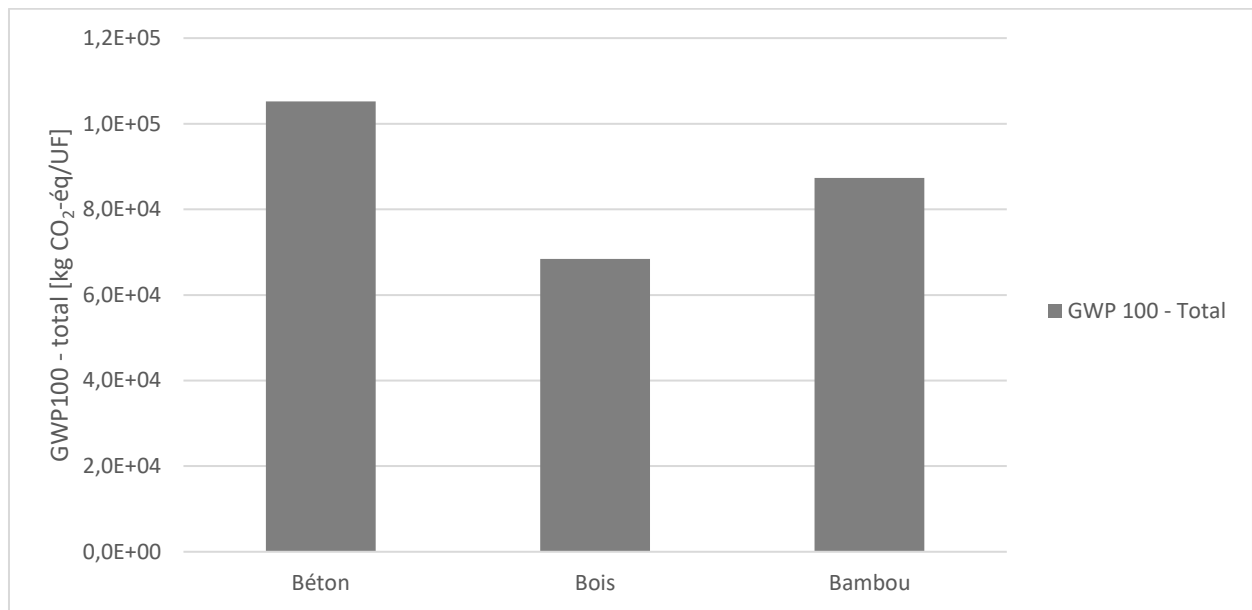


Figure 4-3 : Approche FC=0/0 - Comparaison des scénarios Béton, Bois et Bambou pour l'impact sur les changements climatiques.

La comparaison de l'impact sur les changements climatiques des trois bâtiments (Figure 4-3) montre qu'avec les hypothèses de référence, le bâtiment construit avec des matériaux majoritairement en béton est celui qui a le plus d'impact sur les changements climatiques, suivi du bâtiment majoritairement en bambou puis du bâtiment majoritairement en bois.

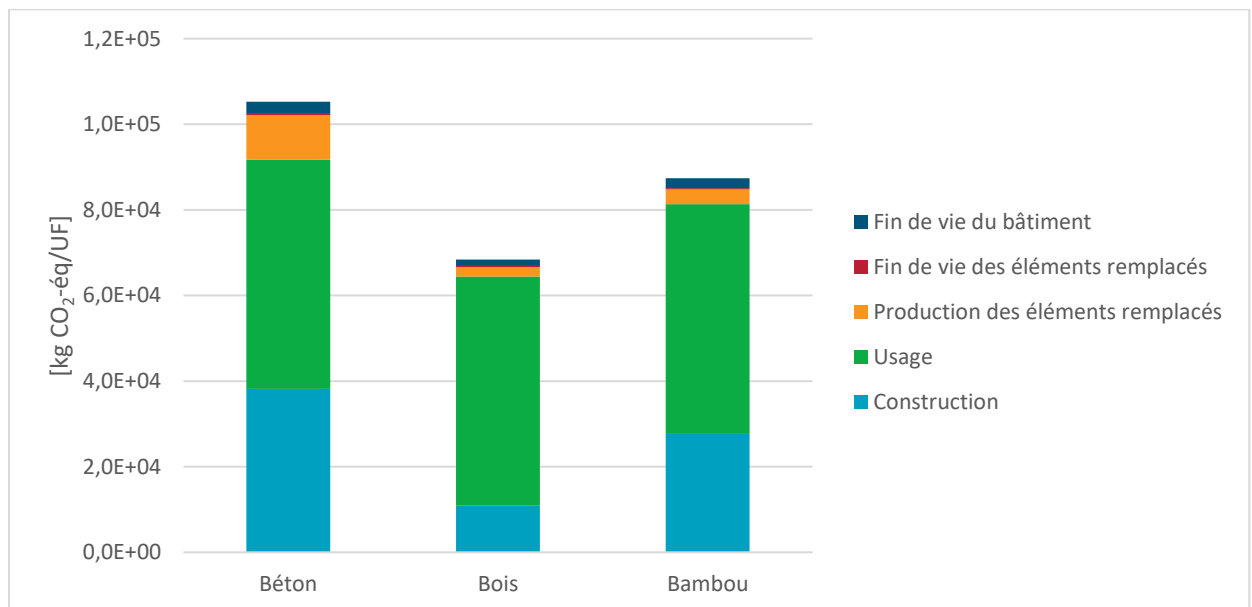


Figure 4-4 : Approche FC=0/0 - Analyse de contribution par étape du cycle de vie.

L'analyse de contribution par étape du cycle de vie (Figure 4-4) montre que l'étape la plus contributrice à l'impact sur les changements climatiques est l'étape d'usage (plus de 50%), qui a est similaire pour les trois bâtiments. La seconde étape qui contribue le plus est l'étape de construction, à cause de la production des matières premières (36% pour le scénario Béton, 15.94% pour Bois et 31.88% pour Bambou).

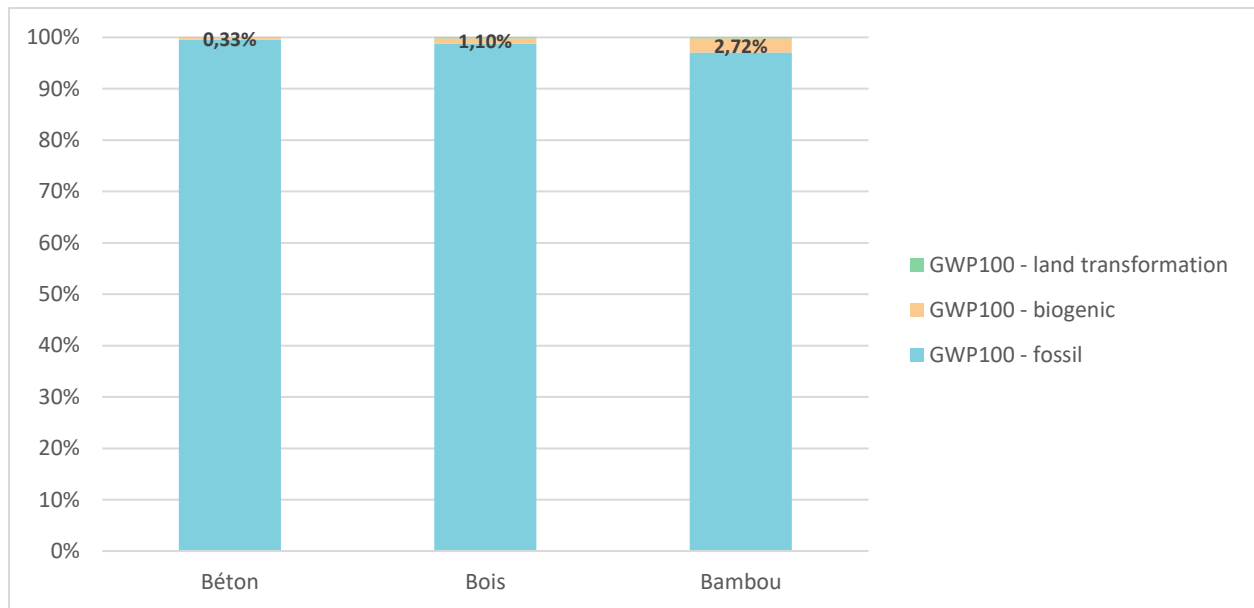


Figure 4-5 : Approche FC=0/0 - Analyse de contribution par sous-indicateur.

La Figure 4-5 donne l'analyse de contribution par sous-indicateur à l'impact total sur les changements climatiques, normalisé à 100% du total. L'indicateur *GWP100 – fossil* est largement le plus contributeur (plus de 97% pour les trois systèmes). Ensuite vient l'indicateur *GWP100 – biogenic*, qui comptabilise dans cette approche uniquement la contribution du **méthane biogénique**. Enfin, l'indicateur *GWP100 – LULUC* est celui qui contribue le moins pour chaque scénario. On note que **même avec l'hypothèse de neutralité carbone, la contribution de l'indicateur *GWP100 – biogenic* n'est pas nulle en raison des émissions de méthane biogénique.**

Dans la section suivante, l'objectif est de tester l'influence de la mise en place de l'approche FC=-1/+1 par rapport à l'approche FC=0/0 sur les résultats obtenus et **d'expliquer les différences**. Une attention particulière est portée à la façon dont les flux de carbone circulent au travers du système et aux enjeux méthodologiques qui y sont liés (choix des frontières du système, multifonctionnalité et traçabilité (*mass-balance*)).

4.3 Application de l'approche FC=-1/+1

4.3.1 Analyse des impacts sur les changements climatiques

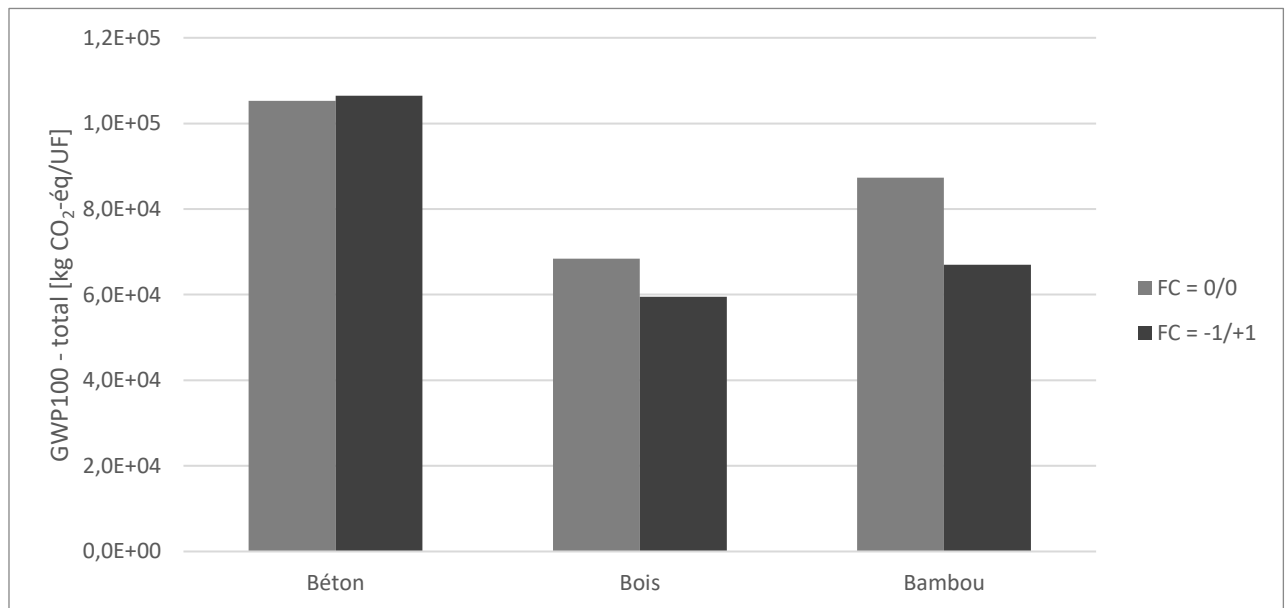


Figure 4-6 : Comparaison des approches FC=0/0 et FC=-1/+1 - Comparaison des scénarios Béton, Bois et Bambou pour l'impact sur les changements climatiques.

L'impact sur les changements climatiques calculé avec les approches FC=0/0 et FC=-1/+1 varie (Figure 4-6). Bien que la hiérarchie des différentes solutions reste inchangée dans l'exemple choisi (le scénario Béton a le score d'impact le plus élevé et le scénario Bois le plus faible), le score absolu du scénario **Béton augmente légèrement** en passant à la méthode FC=-1/+1, tandis que le score **diminue plus significativement** pour les scénarios **Bois et Bambou**.

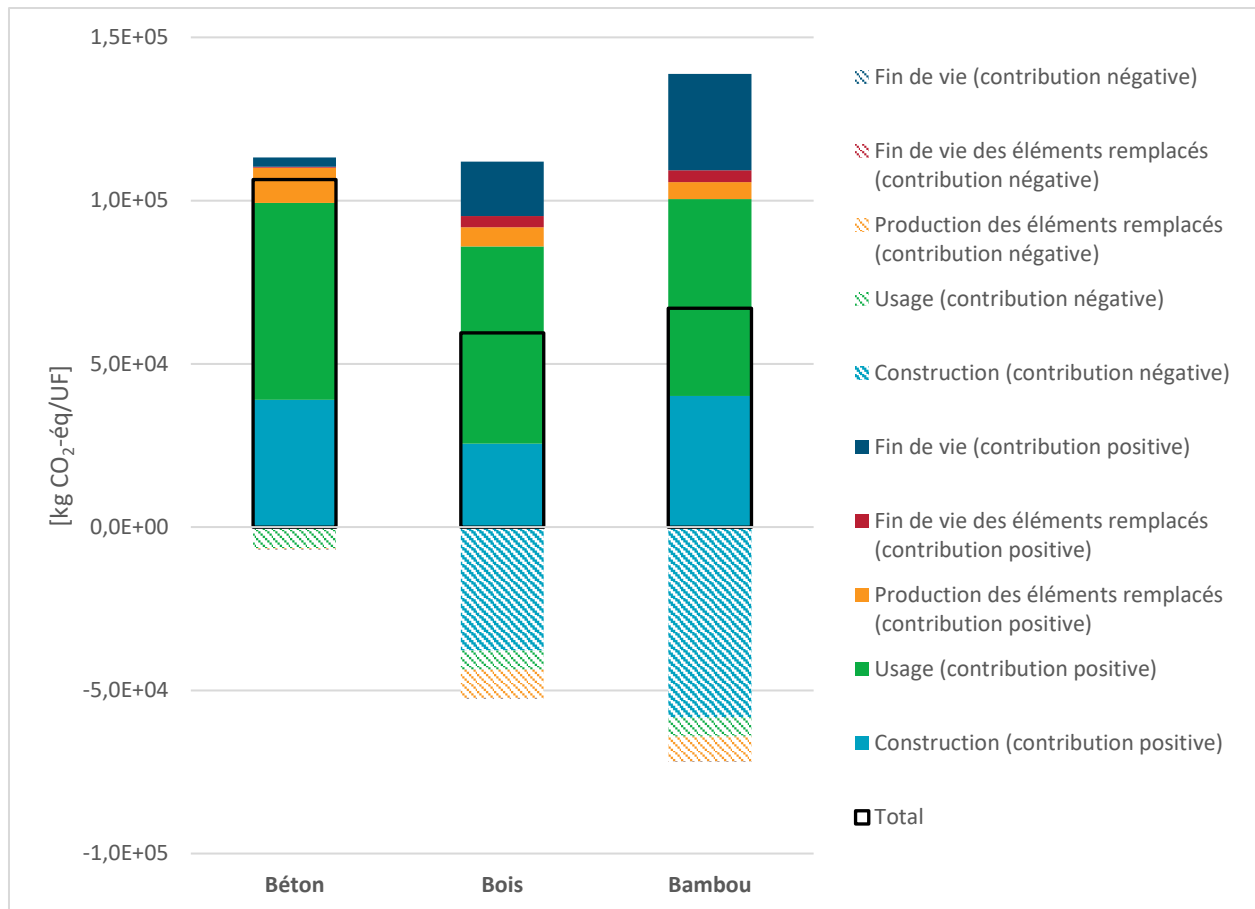


Figure 4-7 : Approche FC=-1/+1 - Analyse de contribution par étape du cycle de vie.

L'analyse de contribution par étape du cycle de vie est très différente en approche FC=0/0 et FC=-1/+1. La Figure 4-7 illustre les contributions positives et négatives des étapes du cycle de vie à l'impact total sur les changements climatiques pour les trois systèmes comparés. Pour le scénario Bois et Bambou, les étapes de construction et de production des éléments remplacés ont une contribution nette négative, car ces étapes correspondent à la séquestration de carbone de l'atmosphère (davantage de carbone est absorbé lors de la production des matières premières qu'il n'est émis dans les activités de production des matières premières et fabrication des matériaux). On note qu'il y a également de la séquestration à l'étape d'usage, bien que le bilan net à cette étape soit positif (davantage d'émissions que de séquestration). **Avec l'approche FC=-1/+1, il est possible de voir la contribution réelle des étapes du cycle de vie (négative ou positive), ce qui n'était pas possible avec l'approche FC=0/0.**

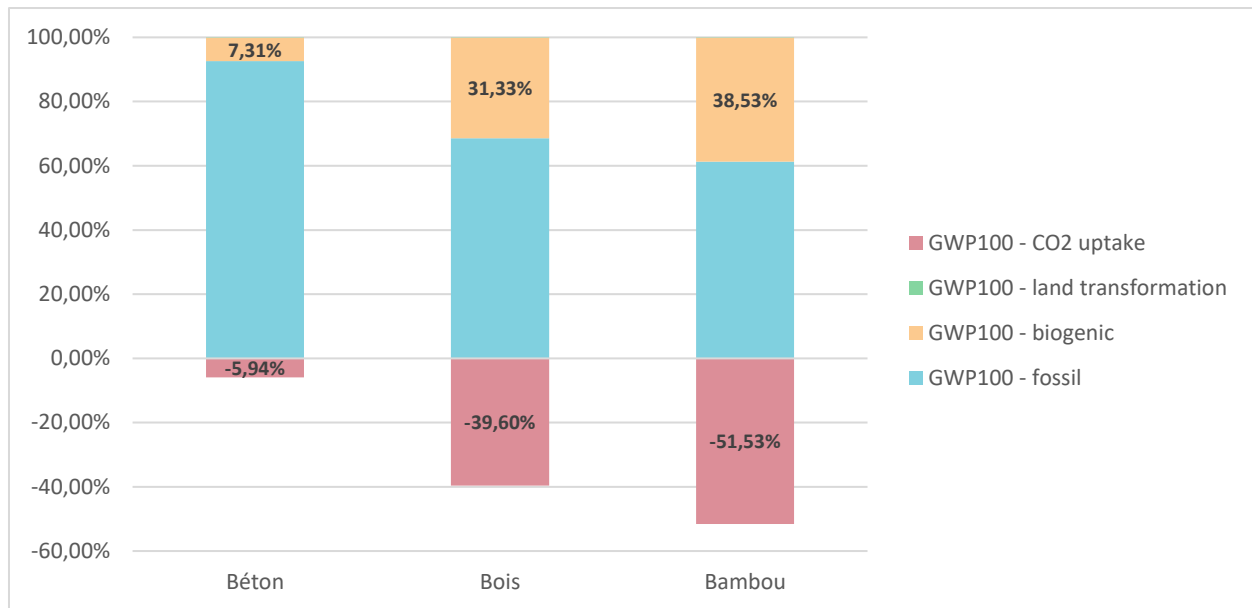


Figure 4-8 : Approche FC=-1/+1 - Analyse de contribution par sous-indicateur.

La Figure 4-8 illustre l'analyse de contribution par sous-indicateur. Les valeurs sont normalisées par rapport à la somme des contributions positives, qui représente 100%. Les valeurs des indicateurs *GWP100 – fossil* et *GWP100 – land transformation* restent inchangées en modifiant l'approche de comptabilisation des GES biogéniques. En revanche, avec l'approche FC=-1/+1, les scores des indicateurs relatifs aux émissions biogéniques (*GWP100 – biogenic* et *GWP100 – CO₂ uptake*) sont bien plus significatifs qu'avec l'approche FC=0/0. **La contribution nette des flux biogéniques n'est pas nulle et est différente de la contribution nette calculée avec l'approche FC=0/0** : elle est légèrement plus élevée pour le scénario Béton et plus faible pour les scénarios Bois et Bambou.

4.3.2 Analyse de l'inventaire des flux de carbone biogénique

Les résultats obtenus montrent que l'impact évité par la séquestration de carbone biogénique ne compense pas l'impact des émissions biogéniques. Une partie du carbone biogénique séquestré ressort sous forme de méthane biogénique, ce qui donne une première explication à cette différence.

Cependant, les émissions de carbone biogénique sous forme de méthane ne permettent pas à elles seules d'expliquer les différences observées. Le Tableau 4-3 présente le bilan de l'ensemble des flux d'inventaire biogéniques et la quantité totale de carbone biogénique entrante et sortante du système pour les trois systèmes étudiés.

Tableau 4-3 : Bilan de carbone biogénique à l'échelle des trois systèmes (excluant les flux liés aux LULUC)

Flux d'inventaire		Béton	Bois	Bambou
GWP100 – CO ₂ uptake	[Raw] Carbon dioxide, in air [kg]	4 516	50 187	69 595
	[Raw] Carbon dioxide, non-fossil, resource correction [kg]	2 205	-11 173	1 651
Quantité totale de carbone entrante		1 833	10 640	19 431
GWP100 – biogenic	[Air] Carbon dioxide, biogenic [kg]	7 891	30 043	50 650
	[Air] Methane, biogenic [kg]	13	28	88
Non caractérisé	[Air] Carbon monoxide, biogenic [kg]	11	23	345
Quantité totale de carbone sortante		2 166	8 224	14 027
Quantité sortante / quantité entrante		1.18	0.77	0.72

Note : Bien que le CO ne soit pas caractérisé, il contribue au bilan de masse du carbone biogénique et est donc inclus au bilan au niveau de l'inventaire.

L'analyse au niveau de l'inventaire montre que **la quantité de carbone biogénique entrante dans le système n'est pas égale à la quantité de carbone biogénique sortante**. Pour le scénario Béton, il y a davantage de carbone biogénique qui sort du système que de carbone biogénique qui y entre. Pour les deux autres scénarios, c'est l'inverse : davantage de carbone biogénique est séquestré que la de carbone biogénique émise. Les flux de méthane et de monoxyde de carbone étant présents en très faible quantité dans le système, la suite de l'analyse porte sur les flux de CO₂ biogéniques uniquement. Une analyse de contribution par étape du cycle de vie pour les flux de CO₂ biogéniques séquestrés (*[Raw] Carbon dioxide, in air*) et émis (*[Air] Carbon dioxide, biogenic*) est disponible à la Figure 4-9.

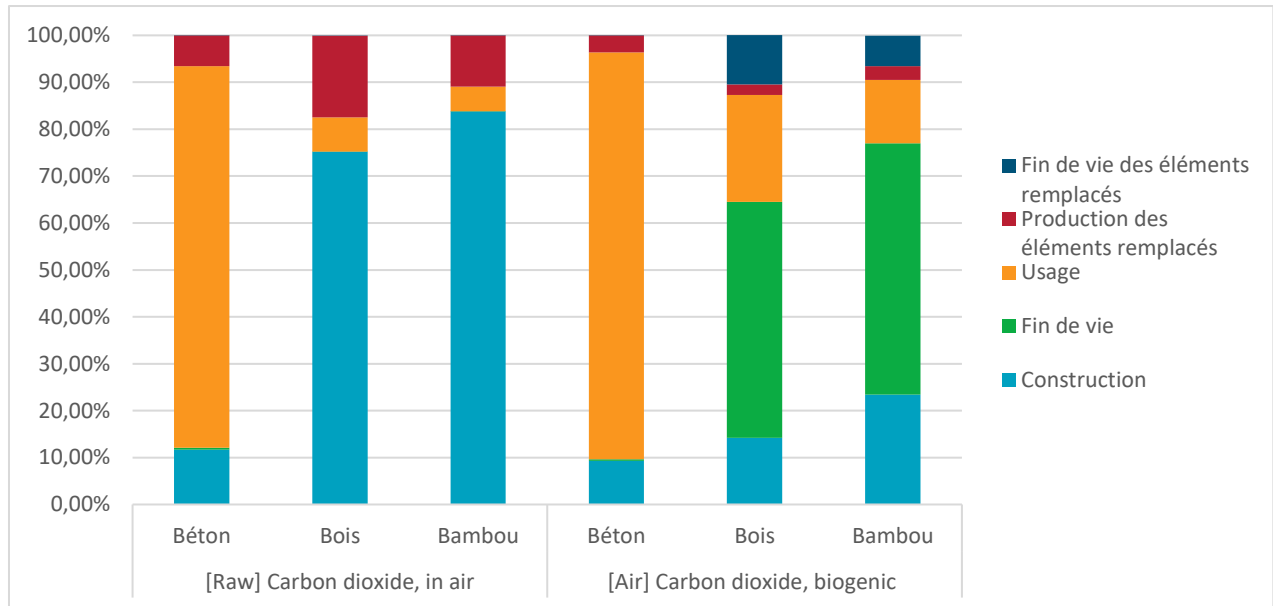


Figure 4-9 : Approche FC=-1/+1 – Carbon dioxide, in air (séquestration) (à gauche) et Carbon dioxide, biogenic (émission) (à droite) - Analyse de contribution par étape du cycle de vie, valeurs normalisées à 100% du total.

Pour le scénario Béton, l'étape d'usage est l'étape au cours de laquelle la majorité du carbone biogénique entre et sort dans le système. Les quantités absolues sont beaucoup plus faibles pour le scénario Béton que pour les autres scénarios. Pour les autres scénarios contenant des matériaux de construction biosourcés, le carbone biogénique est absorbé majoritairement au cours de l'étape de construction et de production des matériaux remplacés, qui englobe l'étape de croissance des plantes à l'origine des matériaux utilisés. Le carbone biogénique est émis majoritairement à l'étape de fin de vie et de fin de vie des matériaux remplacés. Plus précisément :

- **Scénario Béton :**

- **Séquestration :** L'absorption de CO₂ biogénique a majoritairement lieu à l'étape **d'usage**, en raison du processus de production des copeaux de bois utilisés pour produire de l'électricité dans le mix électrique français. L'absorption de CO₂ biogénique a lieu également à l'étape de **construction** et de **production des éléments remplacés**, au niveau des infrastructures et de la production d'énergie utilisée par les processus de production des matériaux de construction.
- **Emissions :** L'émission de CO₂ biogénique a majoritairement lieu à l'étape **d'usage** dans le processus de production d'électricité à partir de copeaux de bois (environ 60% des émissions totales) et du processus de production d'électricité à partir de biogaz (environ 10% des émissions totales) dans le mix électrique français. L'émission de CO₂ biogénique a lieu également à l'étape de **construction** et **production des éléments remplacés** au niveau des infrastructures ou de la production d'énergie utilisés par les processus de production des matériaux de construction.

- **Scénario Bois :**

- **Séquestration :** Le CO₂ biogénique est majoritairement absorbé par les processus de foresterie dans l'étape **construction** et **production des éléments remplacés** lors de la production **du bois** utilisé pour la construction de la structure aérienne et des finitions.
- **Emissions :** Le CO₂ biogénique est majoritairement émis à l'étape de **fin de vie** et **fin**

de vie des éléments remplacés, lors du **traitement de fin de vie du bois** utilisé pour la construction de la structure aérienne et des finitions.

- **Scénario Bambou :**
 - **Séquestration :** Le CO₂ biogénique séquestré vient en très grande majorité du processus de culture du bambou dans les étapes de **construction et production des éléments remplacés**.
 - **Émissions :** Le flux de CO₂ biogénique est majoritairement émis à l'étape de **fin de vie et fin de vie des éléments remplacés** lors du traitement de fin de vie du bambou. Du CO₂ biogénique est émis à l'étape de **construction**, car le processus de production de bambou génère des pertes qui sont incinérées. Ainsi, les émissions de l'incinération des pertes sont à l'origine d'une part significative (environ 20 %) émissions de CO₂ biogéniques.

Finalement, il s'avère difficile de suivre les flux de carbone à travers l'ensemble du système : plusieurs enjeux comme les processus de marchés, les différentes voies de fin de vie envisagées tout au long du cycle de vie (en avant plan et en arrière-plan), les processus alloués, etc. rendent difficile la compréhension et la vérification de la façon dont circulent les flux de carbone biogénique dans le système. **L'analyse de contribution par étape du cycle de vie pour les flux élémentaires de carbone biogénique n'est pas suffisante pour identifier clairement l'origine des déséquilibres entre quantités de carbone séquestrée et émise.**

4.3.3 Identification des enjeux potentiellement à l'origine du déséquilibre entre carbone biogénique séquestré et émis

Parmi les enjeux identifiés dans la section 2.3.1, les facteurs qui peuvent modifier le bilan des flux de carbone au niveau de l'inventaire sont identifiés en répondant aux questions suivantes :

- Le système contient-il des **processus susceptibles de stocker du carbone biogénique de manière permanente** ? Oui (par exemple, présence d'enfouissement dans les voies de fin de vie considérées). Cet enjeu est potentiellement à l'origine du déséquilibre.
- Les frontières du système couvrent-elles **l'ensemble des étapes de séquestration et de traitement de fin de vie en avant-plan** ? Oui, ces étapes sont incluses. Cet enjeu n'est pas à l'origine du déséquilibre.
- Le système contient-il des **processus multifonctionnels** ? Y a-t-il des **processus alloués** ? Y a-t-il du **cut-off** ? **Oui** (par exemple, allocation de co-produits dans la chaîne de production du bois). Cet enjeu est potentiellement à l'origine du déséquilibre.
- **Y a-t-il un enjeu de traçabilité (mass-balance)** (pour des intrants, des sortants ou au sein du système de produit) ? Non. Cet enjeu n'est pas à l'origine du déséquilibre.

Dans la suite de cette section, chacun des enjeux identifiés comme potentiellement à l'origine du déséquilibre est traité en détail pour le scénario Bois. Les enjeux de multifonctionnalité et de stockage permanent de carbone biogénique sont mis en avant dans la Figure 4-10 qui détaille davantage le système de produit du scénario Bois.

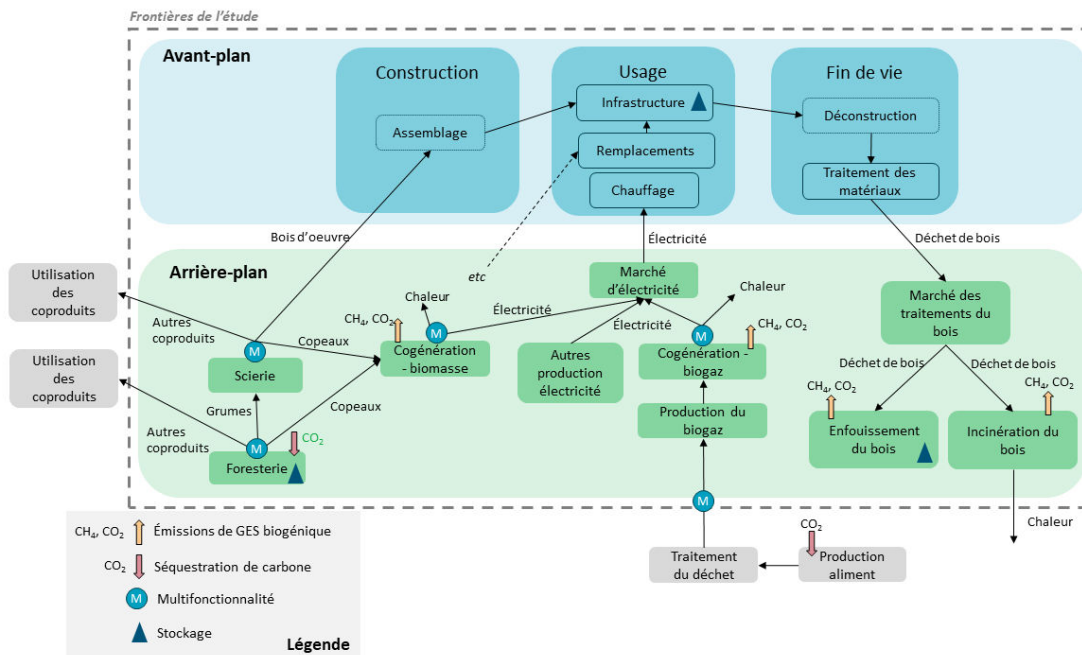


Figure 4-10 : Arbre des processus détaillé pour le scénario Bois, mettant en avant les enjeux de multifonctionnalité et de stockage permanent de carbone biogénique.

4.3.4 Stockage permanent de carbone biogénique

Les bâtiments sont composés de nombreux éléments construits avec des matériaux différents. Chacun de ces matériaux est traité en fin de vie par un processus de marché qui modélise la moyenne des différentes voies de fin de vie spécifiques à ce matériau en France. Ainsi, chaque marché est composé de plusieurs processus de fin de vie. Il y a donc de nombreux processus de traitement de fin de vie impliqués dans le système.

Dans le scénario Bois, la structure aérienne en bois est traitée en fin de vie par le processus *market for waste wood, untreated {FR}*. La composition du marché français est la suivante : 61% de la matière est envoyée en incinération municipale, 0.5% en combustion à l'air libre (*open burning*) et 38.5% à l'enfouissement. Afin de mettre en évidence le stockage de carbone, la Figure 4-11 montre comment les flux de carbone biogénique circulent dans le système à l'aide d'un diagramme de Sankey. Les valeurs sont calculées à partir du contenu en carbone biogénique et de la masse des flux entrants et sortants des processus. Le stockage est calculé à partir de la différence entre la quantité de carbone émise à l'environnement (émission, flux élémentaire) et la quantité de carbone entrant dans le processus (intrant de la technosphère).

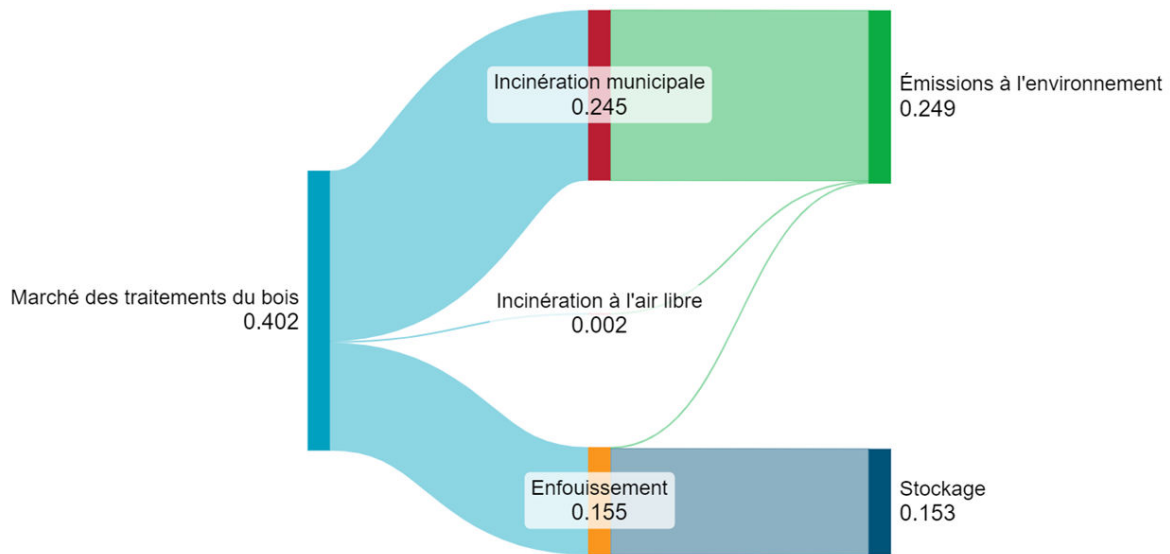


Figure 4-11 : Flux de carbone biogénique dans le marché de traitement de fin de vie du bois français pour 1kg de déchet de bois traité (valeurs données en kilogramme de carbone biogénique)

Ainsi, environ 98,5% du carbone biogénique est stocké par le processus d'enfouissement des déchets en bois. À l'échelle du marché, cela représente environ 38% de la quantité de carbone biogénique entrante qui reste stockée.

Ainsi, cet exemple montre que **la différence entre la quantité de carbone biogénique émise et séquestrée à l'échelle du système est expliquée principalement par le stockage permanent de carbone par les processus d'enfouissement**. Cependant, **il est difficile de calculer exactement la quantité de carbone séquestrée à l'échelle du système** en raison du nombre de processus mis en jeu à l'étape de fin de vie, car des marchés différents sont mis en jeu pour chaque élément de construction. Les logiciels ACV actuellement disponibles ne permettent pas d'extraire cette information facilement pour un grand nombre de processus.

De plus, **d'autres étapes de traitement de déchet apparaissent à d'autres étapes du cycle de vie du système**. Par exemple, le processus impliqué pour la production de bambou pour le scénario Bambou génère des déchets qui sont directement brûlés à l'air libre. Dans ce cas-là, la fin de vie des déchets de production est incluse à l'étape de construction. Le carbone biogénique ressort alors du système dans le cas d'une combustion, mais une autre hypothèse pour le choix du traitement de fin de vie des déchets de bambou aurait pu mener à un stockage permanent.

Le stockage permanent de carbone biogénique est donc une cause du déséquilibre du bilan à l'échelle du système. Néanmoins, l'identification et la comptabilisation de l'ensemble des processus pouvant potentiellement séquestrer du carbone biogénique s'avère complexe.

4.3.5 Multifonctionnalité

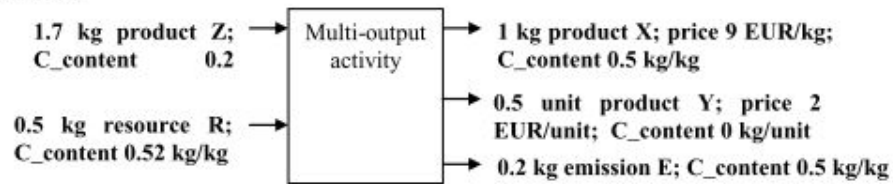
La base de données *ecoinvent* vient avec des choix d'allocation par défaut (Weidema B P et al., 2013). En effet, la version de *ecoinvent* choisie ici est la version *cut-off*. Dans cette version, l'ensemble des flux intermédiaire sont classés selon qu'ils constituent un **co-produit** (*allocatable product*), un **sous-produit**

(*recyclable product*) ou un **déchet** (*waste products*) (voir section 2.3.1.2.1 pour définitions). La manière de gérer l'allocation dans la base de données dépend de ce statut.

Pour les allocations de **co-produits**, la base de données *ecoinvent* repose sur l'allocation économique à quelques exceptions près, comme pour l'énergie, pour laquelle l'allocation est basée sur l'exergie. Pour réaliser l'allocation économique, un paramètre nommé *true value* qui reflète la hiérarchie économique des produits d'un processus multifonctionnel a été introduit. Le facteur d'allocation utilisé pour chaque processus est donné dans la description du produit de référence du processus, mais la manière de le calculer n'est pas toujours détaillée.

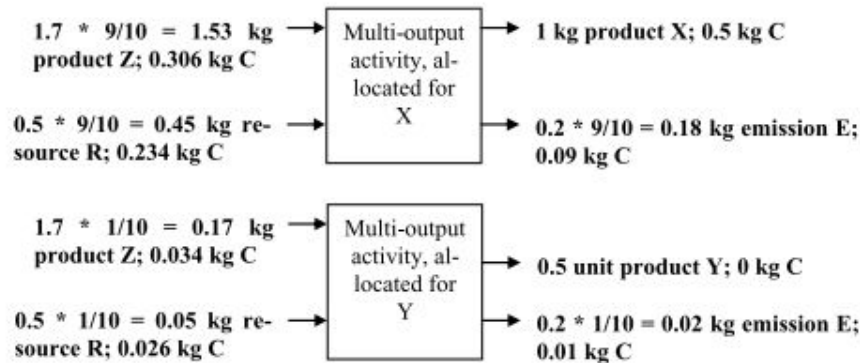
Comme mentionné à la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, l'allocation risque de perturber le bilan de carbone à l'échelle du processus. Ainsi, **une correction spécifique aux flux de carbone biogénique a été mise en place dans *ecoinvent*** à partir de la version 3.9 en ajoutant un flux appelé *Carbon dioxide, non-fossil, resource correction* pour corriger le bilan de masse du carbone biogénique à l'échelle de chaque processus alloué. La Figure 4-12 donne un exemple numérique d'un processus multifonctionnel fictif auquel une allocation économique est appliquée, puis pour lequel le bilan en carbone biogénique est corrigé. Dans les paragraphes suivants, le flux de correction sera recalculé à la main pour un processus multifonctionnel apparaissant dans l'étude de cas selon les mêmes étapes.

Before allocation:



Total revenue (EUR): $1 * 9 + 0.5 * 2 = 9 + 1 = 10$

After allocation:



After allocation correction for carbon:

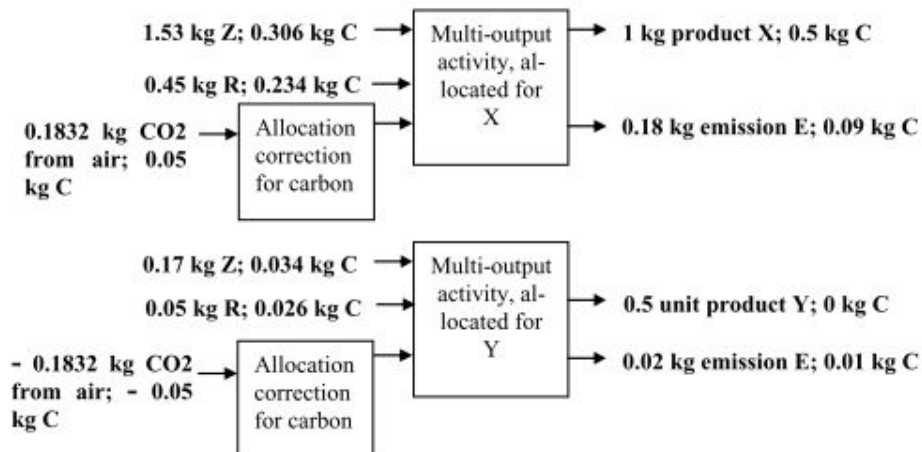


Figure 14.11. The numerical example of an allocation by revenue from Figure 14.8, with the carbon contents from Figure 14.10. After allocation, the activity allocated for X misses an input of 0.05 kg of C, while the activity allocated for Y has a surplus input of 0.05 kg of C. The allocation correction datasets remove the surplus input from the activity allocated for Y and add it to the activity allocated for X, so that both allocated activities balance for both revenue and carbon.

Figure 4-12 : Exemple numérique d'une allocation économique dont le bilan de masse de carbone biogénique a été corrigé.

Après allocation, le processus alloué produisant X est déficitaire de 0.05 kg de C, alors que le processus alloué produisant Y a un surplus de 0.05 kg de C. La correction retire le surplus de C au processus alloué produisant Y pour le donner au processus alloué produisant X de manière que le bilan de carbone biogénique soit équilibré entre les intrants et les sortants (reproduit de Weidema B P et al. (2013))

4.3.5.1 Exemple d'allocation de co-produit dans le scénario Bois

De nombreux processus sont multifonctionnels dans les trois systèmes à l'étude. Dans le scénario Bois, par exemple, le processus *sawing, hardwood {Europe without Switzerland}* est utilisé pour modéliser l'étape où le bois est scié pour devenir un produit utilisable en construction. Dans cette partie, l'objectif est de comprendre comment l'allocation économique est réalisée dans *ecoinvent* et comment le flux *Carbon dioxide, non-fossil, resource correction* est implémenté et utilisé. La Figure 4-13 montre le processus de scierie *sawing, hardwood {Europe without Switzerland}* et ses quatre différents produits, avant allocation.

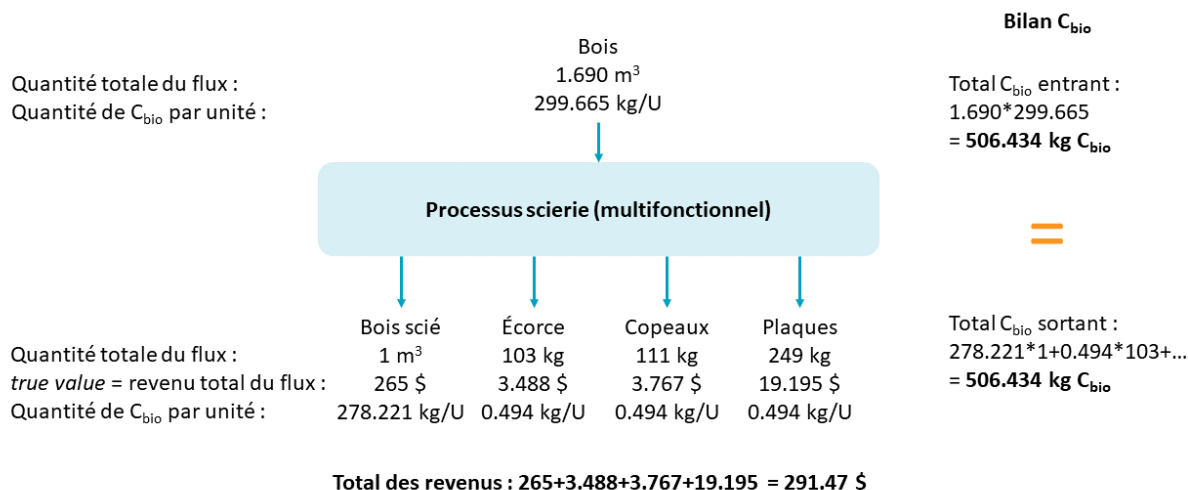


Figure 4-13 : Schéma représentatif du processus *sawing, hardwood {Europe without Switzerland}* non alloué (partiellement reproduit de la documentation du processus *ecoinvent*, n.d.-a)).

La Figure 4-13 donne l'ensemble des informations nécessaires pour pouvoir recalculer les valeurs des processus alloués : les quantités totales des flux entrants et sortants (dans leurs unités respectives, qui ne sont pas nécessairement les mêmes), le revenu total obtenu par la production de chaque produit (donné par le paramètre *true value*) et les quantités de carbone biogénique (abrégié C_{bio}) par unité de flux. Pour le bois, le contenu en carbone biogénique par mètre cube est calculé en multipliant le contenu en carbone biogénique par kilogramme du bois par sa masse sèche. Le bilan de carbone biogénique est donné sur la droite de la figure. Pour le processus non alloué, la quantité totale de carbone biogénique entrante est égale à la quantité totale de carbone biogénique sortante.

Non alloué, le processus a un produit principal, le bois scié (*sawn wood*), et trois co-produits : de l'écorce (*bark*), des copeaux (*sawdust*) et des plaques (*slabs/sidings*). Chacun de ces co-produits ont des utilisations différentes. Ce processus est donc divisé en quatre processus alloués dans la base de données, chacun produisant l'un des produits sans produire les autres. La documentation du processus non alloué est disponible pour avoir l'ensemble des valeurs des intrants et sortants du processus avant allocation et ainsi recalculer les valeurs obtenues avec l'allocation économique et la correction du bilan de masse du carbone biogénique.

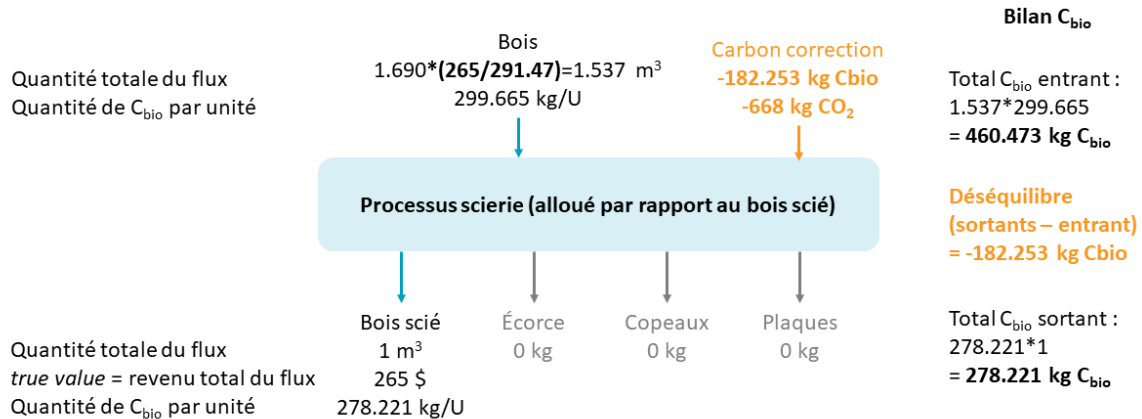


Figure 4-14 : Schéma représentatif du processus sawing, hardwood {Europe without Switzerland} alloué par rapport au bois scié (sawnwood)

La démarche pour recalculer les valeurs du processus alloué, données en Figure 4-14, est la suivante : le facteur d'allocation économique est calculé à partir des revenus. Il correspond à la part de revenus générés par la production du bois scié (ici, 265 \$) par rapport au revenu total de l'activité non allouée (291,47 \$, voir Figure 4-13). Le facteur d'allocation est ensuite appliqué à l'ensemble des flux du processus non alloué (dans cet exemple, seul l'intrant de bois est alloué car c'est le seul flux contenant du carbone biogénique), excepté les autres produits qui sont mis à 0. On obtient le processus alloué par rapport au bois scié, selon une allocation économique. Le bilan de carbone biogénique est donné sur la droite de la figure. Pour le processus alloué par rapport au bois scié, la quantité totale de carbone biogénique entrante n'est pas égale à la quantité totale de carbone biogénique sortante (il y a 182.253 kg de carbone biogénique de plus qui entre dans le processus que de carbone biogénique qui en sort). À noter que les quantités du bilan sont des masses de carbone biogénique, il faut donc multiplier par le rapport stœchiométrique du CO₂ (44/12) pour retrouver la valeur du flux de CO₂ biogénique de correction.

La Figure 4-14 représente le processus alloué par rapport au produit principal, le bois scié. Dans ce cas, le facteur d'allocation est relativement proche de 1 (environ 0.91) car le bois scié étant le produit principal du processus de scierie, il génère la majorité de ses revenus. L'allocation économique alloue donc une grande quantité de bois entrante à la production de bois scié, et ainsi une grande proportion des impacts associés à la production de ce bois. Ainsi, la quantité de carbone biogénique totale entrante, contenue dans cette grande quantité de bois, est supérieure à la quantité de carbone biogénique sortante contenue dans le bois scié, ce qui crée un déséquilibre d'environ 180 kilogramme de carbone biogénique. Cela signifie que **davantage de carbone biogénique séquestré est attribué à la production de bois scié que de carbone biogénique que ce bois contient réellement et qui serait potentiellement émis en fin de vie. L'impact environnemental qui en résulterait serait négatif.** Afin de corriger ce déséquilibre causé par l'allocation, le flux de CO₂ biogénique *Carbon dioxide, non-fossil, resource correction* est ajouté pour ajuster la quantité de carbone biogénique entrante à la quantité de carbone biogénique sortante. Dans ce cas, ce flux est un intrant négatif (ce qui correspond à une émission).

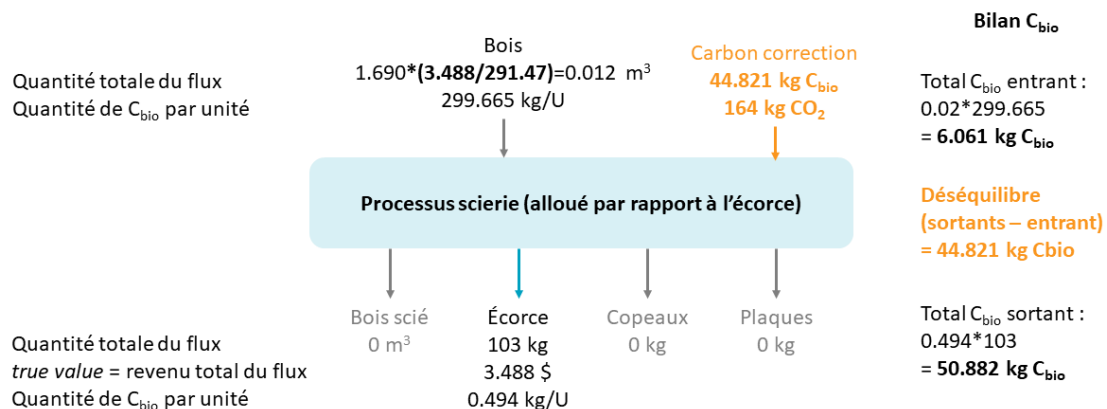


Figure 4-15 : Schéma représentatif du processus sawing, hardwood {Europe without Switzerland} alloué par rapport à l'écorce (bark)

La démarche pour recalculer les valeurs du processus alloué par rapport à l'écorce est la même que la démarche réalisée pour recalculer les valeurs du processus alloué par rapport au bois scié. La part de revenus générés par la production de l'écorce est de 3,488 \$, le revenu total de l'activité non allouée vaut 291,47 \$ (voir Figure 4-13). Le facteur d'allocation est ensuite appliqué. Pour le processus alloué par rapport à l'écorce, la quantité totale de carbone biogénique entrante n'est pas égale à la quantité totale de carbone biogénique sortante (il y a 44.821 kg de carbone biogénique de moins qui entre dans le processus que de carbone biogénique qui en sort). À noter que les quantités du bilan sont des masses de carbone biogénique, il faut donc multiplier par le rapport stœchiométrique du CO₂ (44/12) et pour retrouver la valeur du flux de CO₂ biogénique de correction.

La Figure 4-14 représente le processus alloué par rapport à un co-produit : l'écorce. Dans ce cas, contrairement au cas précédent, le facteur d'allocation est relativement faible (environ 0.01) car l'écorce est un co-produit à faible valeur économique. L'allocation économique alloue alors une faible quantité de bois entrante à la production d'écorce, et ainsi une faible proportion des impacts associés à la production de ce bois. Finalement, la quantité de carbone biogénique totale entrante est inférieure à la quantité de carbone biogénique sortante contenue dans l'écorce, correspondant à un déséquilibre d'environ 45 kilogramme de carbone biogénique. À l'inverse de la situation précédente, cela implique que **moins de carbone biogénique séquestré serait attribué à la production d'écorce que de carbone biogénique que l'écorce contient réellement et qui serait potentiellement émis en fin de vie. L'impact environnemental qui en résulterait serait positif.** Afin de corriger ce déséquilibre causé par l'allocation, le flux de CO₂ biogénique *Carbon dioxide, non-fossil, resource correction* a été ajouté, qui dans ce cas est un intrant positif (ce qui correspond à une séquestration).

Une grande différence est observée entre le processus avec et sans correction pour les flux de carbone biogénique. Avec la correction, **la quantité de carbone biogénique séquestrée entrante correspond à la quantité de carbone biogénique contenue dans le produit sortant et susceptible d'être relâchée dans l'atmosphère**, ce qui contribue à **équilibrer le bilan de carbone biogénique** à l'échelle du système. **La correction des flux de carbone biogénique permet de régler le problème de bilan de masse causé par l'allocation.** Ce flux est uniquement présent par défaut dans l'arrière-plan de la base de données *ecoinvent*. Si une allocation a lieu dans l'avant plan ou si une autre base de données est utilisée, le praticien doit s'assurer de corriger le bilan des flux de CO₂ biogéniques de la même façon, à la main.

Encadré 5 : Allocation carbone dans la base de données ecoinvent

Dans la documentation de la base de données *ecoinvent* de Wernet et al. (2016), il est fait mention d'une version de la base de données permettant de faire une analyse des flux de carbone (*carbon flow analysis*) qui serait en voie de développement et qui serait proche d'une base de données pour laquelle toutes les allocations sont basées sur les flux de carbone. Cependant, comme du carbone est également contenu dans des flux élémentaires (et pas seulement dans des flux économiques), il ne s'agit pas exactement du même type d'allocation que l'allocation traditionnellement effectuée en ACV. Le paramètre *carbon allocation*, déjà implémenté dans la version actuelle de la base de données et visible pour les flux économiques, permettrait de passer à cette nouvelle version. À notre connaissance, cette version de la base de données n'est pas disponible. Cette version faciliterait grandement le suivi des flux de carbone dans un système.

4.3.5.2 Exemple de *cut-off* pour un produit entrant

Dans le système à l'étude, le bâtiment est chauffé avec une électricité basée sur le mix électrique français, qui comporte une part d'électricité produite avec du biogaz par le processus *heat and power co-generation, biogas, gas engine {FR}*. Ce processus modélise la production d'électricité et de chaleur en utilisant du biogaz issu de la digestion de déchets organiques (fumier, biodéchets, boues d'épuration et huile de cuisson végétale usagée).

Les émissions directes biogéniques de ce processus sont calculées à partir du contenu en carbone du biogaz. Cependant, à cause de l'approche *cut-off*, chacun de ces déchets arrive sans impact dans le système de produit. Ainsi, **la séquestration de carbone biogénique contenu dans le biogaz n'est pas modélisée à l'intérieur de nos frontières.**

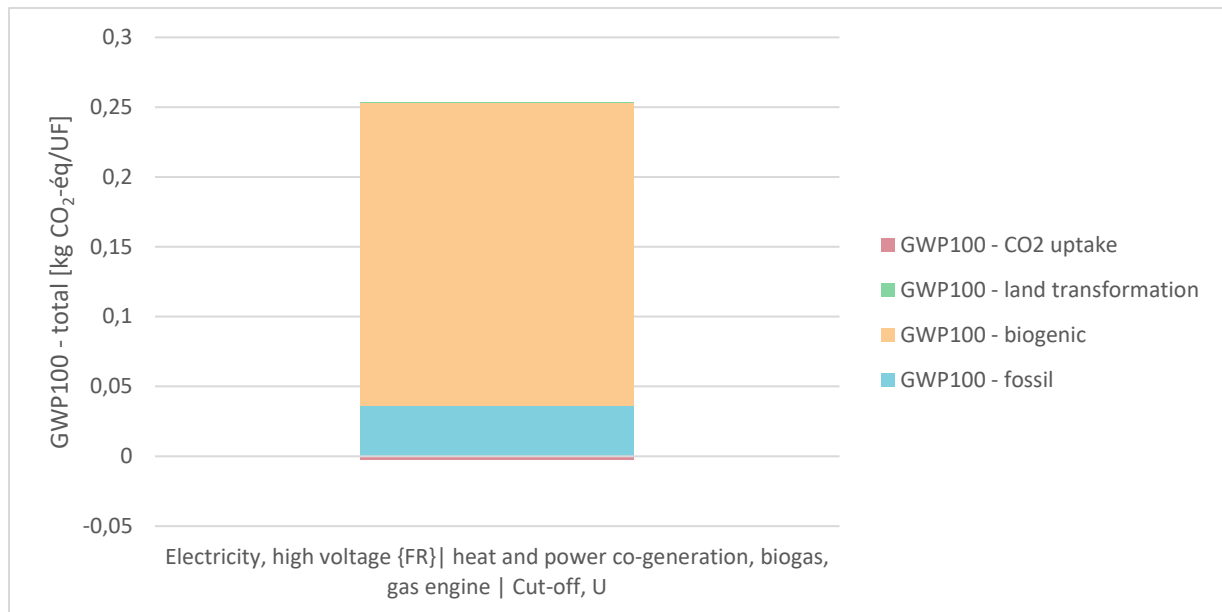


Figure 4-16 : Analyse de contribution de l'impact de la production d'électricité à partir de biogaz issu de digestion de déchets organiques.

La Figure 4-16 montre que la séquestration, prise en compte par le sous-indicateur *GWP100 – CO2 uptake*, est très faible par rapport à l'émission de carbone biogénique prise en compte par le sous-indicateur *GWP100 – biogenic*. Il y a environ 65 fois plus de carbone qui sort du processus de production d'électricité que de carbone qui y entre.

Les bases de données **devraient permettre l'inclusion de la séquestration ou de l'émission considérée hors des frontières du système avec l'approche *cut-off***, et les praticiens **devraient les inclure à la main pour les processus d'avant-plan**. Dans notre système de produit, l'impact de la non-prise en compte de la séquestration pour ce processus est très limité, car le biogaz représente moins de 0.2 % du mix énergétique français. Ainsi, aucune correction n'a été faite. Cependant, **pour une étude comparant les technologies de production d'énergie, l'enjeu serait beaucoup plus grand**.

4.3.6 Autres problèmes liés à l'opérationnalisation :

D'autres enjeux sont apparus au cours de l'étude de cas :

- **Le bilan de masse n'est pas toujours respecté à l'échelle des processus** présents dans la base de données *ecoinvent*, même sans allocation. Le processus non alloué de scierie *sawing, hardwood {Europe without Switzerland}* pris comme exemple dans la section 4.3.5.1 produit, en plus des flux détaillés pour l'exemple, un flux de déchet qui contient aussi du carbone biogénique. Cette quantité de carbone biogénique apparaît dans les flux sortants mais n'entre pas dans le processus. Du carbone biogénique est « créé » et vient perturber l'équilibre entre quantité de carbone biogénique séquestrée et émise. Cette observation pourrait être valable pour d'autres processus et d'autres bases de données.
- **Le contenu en carbone biogénique des processus n'est pas toujours constant dans le système, en fonction des hypothèses et des données choisies.** Par exemple, le contenu en carbone biogénique des processus produisant les matières premières biosourcées contenant du carbone biogénique n'est pas toujours identique au contenu en carbone biogénique des déchets traités en fin de vie. C'est notamment vrai pour les processus de traitement de fin de vie du bois, qui supposent un contenu en carbone de la matière entrante

de 48.46 %, tandis que le bois issu des processus de foresterie a un contenu en carbone biogénique de 49.01 % (valeur qui semble commune à tous les processus de foresterie indépendamment de l'espèce d'arbre, de la géographie...). L'idéal serait de pouvoir modéliser le contenu en carbone spécifique au produit modélisé, et d'adapter les coefficients pour les processus *ecoinvent*. Lorsqu'un processus générique est utilisé, il est aussi nécessaire d'ajuster son contenu carbone.

- **Les flux de carbone absorbé par la biomasse ne sont pas toujours modélisés de la même façon** : en théorie, le flux de CO₂ entrant est calculé à partir du contenu en carbone biogénique de la matière sèche multiplié par un facteur stœchiométrique (44/12) pour en déduire la quantité de CO₂ absorbée par photosynthèse. Dans la pratique, la quantité de CO₂ entrant modélisée dans les jeux de donnée agricoles est parfois plus importante que le contenu carbone de la biomasse récoltée, résultant d'une mauvaise application des lignes directrices d'*ecoinvent*. Cela peut correspondre à la quantité brute de CO₂ absorbée par la plante sans prendre en compte le CO₂ relargué lors de la respiration ou au contenu carbone de la biomasse qui n'est pas récolté (ex. résidus restant au sol) (Patouillard, Maxime, Ménard, Louineau, et al., 2022)
- **La contribution de l'arrière-plan** est particulièrement difficile à vérifier et peut s'avérer non négligeable en fonction du système modélisé. Par exemple, pour le scénario Béton, expliquer la différence d'impact entre l'application de l'approche FC=0/0 et FC=-1/+1 nécessite d'effectuer une analyse précise des flux de carbone biogénique en arrière-plan, car aucun processus d'avant plan ne contribue.

4.4 Application de l'approche dynamique

La prise en compte des aspects temporels peut se faire avec différentes méthodes (voir section 2.3.2). Le Tableau 4-4 résume les méthodes qui sont appliquées dans l'étude de cas et leurs principales caractéristiques.

Tableau 4-4: Méthodes dynamiques sélectives et dynamiques appliquées à l'étude de cas

Méthode	Objectif	Approche de comptabilisation	Modification de l'ICV	Modification de l'EICV	Horizon temporel
tonne.année (simplification de Lashof selon ILCD Handbook)	Comptabilisation du stockage temporaire du carbone	FC=-1/+1	Non	Non	Fixe
GWPbio	Comptabilisation de l'effet de la croissance de la biomasse et du stockage temporaire	FC=0/0	Non	Oui	Fixe
Levasseur (DynLCA)	Comptabilisation dynamique des flux et des facteurs de caractérisation	FC=-1/+1	Oui	Oui	Variable

L'application de ces méthodes vient **remplacer ou compléter** la façon dont l'inventaire ou les impacts de cycle de vie sont calculés. Aussi, leur utilisation implique, en général, une **recherche additionnelle de données**, une **modélisation plus complexe** et **l'utilisation d'outils en dehors des logiciels d'ACV** traditionnellement utilisés (Simapro, Gabi, OpenLCA).

Établir l'inventaire des flux contenant du carbone (fossile et biogénique) pour chaque étape du cycle de vie constitue le point de départ commun de toutes les méthodes testées. Les tableaux présentant les flux de carbone biogéniques et fossiles de l'avant-plan des trois systèmes à l'étude sont donnés en Annexe 2. Le calcul de ces bilans est fait manuellement à partir du contenu en carbone biogénique de chaque flux fourni dans la documentation des processus d'*ecoinvent*. Ces valeurs sont renseignées dans la base de données sous la forme d'une propriété, appelée *biogenic carbon content*.

4.4.1 Méthodes tonne.année

Les méthodes tonne.année sont appliquées de manière complémentaire à l'approche statique pour tenir compte du stockage temporaire de carbone. Dans l'étude de cas, le stockage temporaire correspond au carbone séquestré par la biomasse qui reste en dehors de l'atmosphère pendant la durée de vie des différents éléments de construction contenant de la biomasse. Parmi les méthodes tonne.année décrites à la section 462.3.2.4.1, la méthode proposée dans le ILCD Handbook (2010), qui est une simplification de la méthode de Lashof, est utilisée ci-dessous.

Cette méthode considère que le stockage de 1kg de CO₂ pendant 100 ans équivaut à une émission évitée de 100kg de CO₂. Pour simplifier la méthode de Lashof, un facteur linéaire est appliqué : chaque année de stockage ou de délai permet de retrancher 0.01 kg CO₂-éq/kg.année.

L'effet du stockage temporaire est calculé à partir de la quantité de carbone contenue dans chaque élément et sa durée de vie. Ceci doit être fait autant **pour le carbone fossile que pour le carbone biogénique** : ainsi, **le fait de retarder une émission de GES fossile donne également un crédit environnemental au système**. Pour les flux de carbone biogénique, l'approche FC=-1/+1 est utilisée.

En pratique, le ILCD Handbook (2010) recommande l'inclusion d'un nouveau flux d'inventaire nommé *Correction flow for delayed emission of fossil carbon dioxide (within first 100 years)*, exprimés en kg.année, pour intégrer le stockage temporaire. Pour cette étude de cas, ce flux n'a pas été créé, mais l'effet du stockage temporaire a été ajouté manuellement de la même façon : pour chaque flux, la quantité de carbone fossile et biogénique est multipliée par le temps de stockage (ici, correspondant à la durée de vie de chaque élément). Ensuite, cette valeur en kg.année est multipliée par le facteur linéaire mentionné précédemment. La quantité finale obtenue, en kg CO₂-éq, correspond au crédit environnemental lié au stockage. Le calcul est réalisé de la même façon pour les scénarios Béton et Bambou. L'Annexe 2 donne les résultats du calcul pour chaque flux d'avant plan pour les trois scénarios analysés.

Ce crédit est finalement ajouté aux résultats obtenus avec l'approche statique FC=-1/+1 pour chaque scénario. La Figure 4-17 présente la comparaison des trois scénarios avec la contribution des différentes étapes de cycle de vie et l'effet du stockage temporaire du carbone fossile et biogénique. Dans les deux scénarios contenant des matériaux biosourcés, on observe que **l'effet du stockage temporaire du carbone biogénique est significatif**.

Les résultats montrent des scores similaires pour les deux scénarios basés sur la biomasse avec une différence de moins de 10% entre les deux. Bien que le scénario Bambou présente des émissions plus élevées pendant l'étape de fin de vie (plus grand pourcentage d'incinération considéré), la quantité de carbone capté et stocké dans l'élément de finition compense ces émissions.

Il est à noter que **le stockage permanent est implicitement considéré lorsqu'on applique un horizon temporaire**. Les émissions qui ont lieu au-delà de cet horizon (par exemple pour un site d'enfouissement) ne sont pas comptabilisées (voir section 4.3.4).

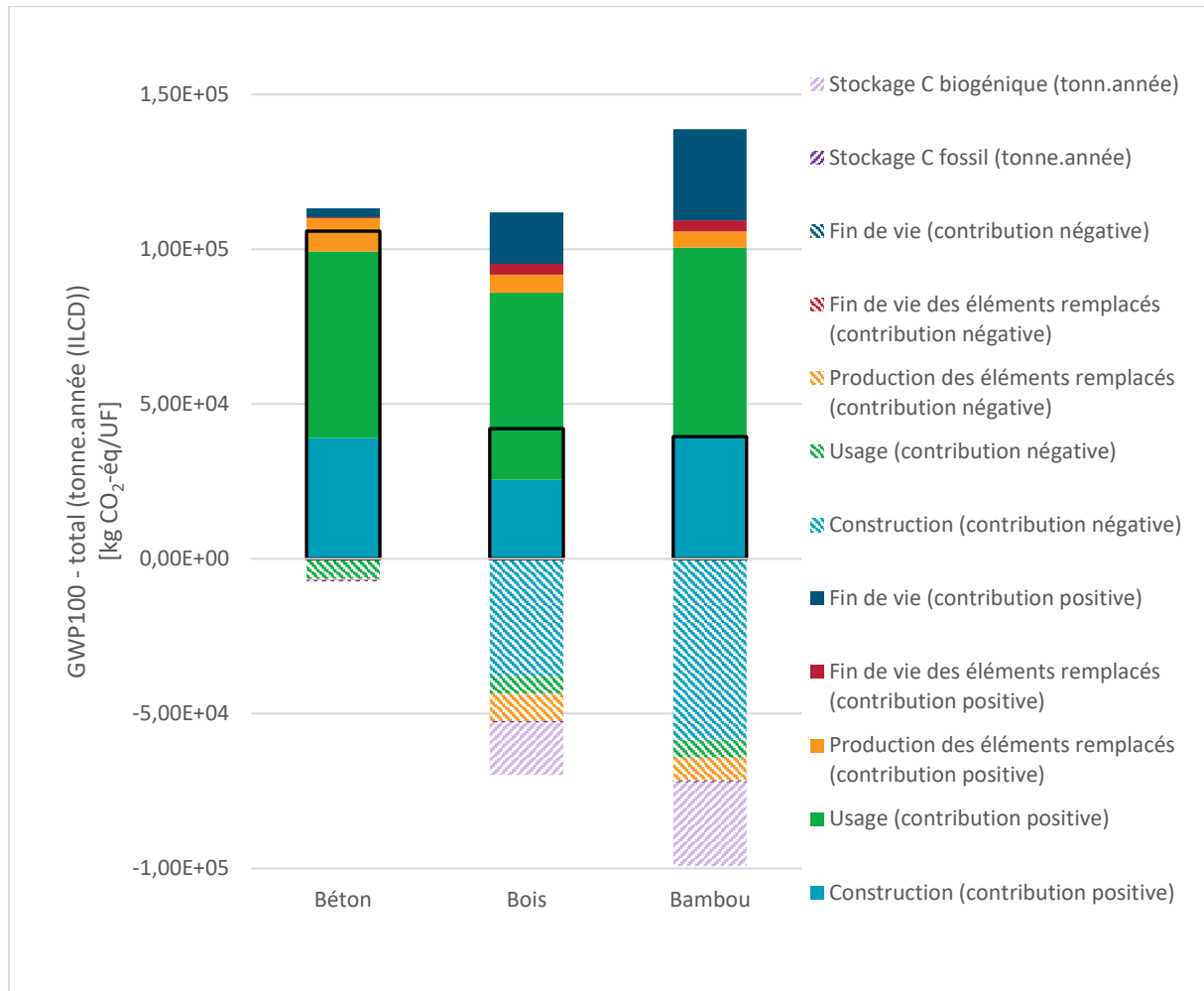


Figure 4-17: Comparaison de résultats avec la méthode du ILCD Handbook.

Cette méthode permet de calculer de manière simplifiée un crédit lié au stockage temporaire avec un nombre limité de manipulations en dehors du logiciel de calcul ACV. En revanche, cette méthode ne prend pas en compte plusieurs aspects dynamiques considérés par d'autres méthodes, comme la dynamique de la croissance de la biomasse ou le moment où les émissions ont lieu.

4.4.2 Méthode GWPbio

La méthode GWPbio (Cherubini et al., 2011b) tient compte, dans sa version initiale, de la dynamique de croissance de la biomasse à des fins énergétiques. La méthode, basée sur l'approche de neutralité carbone, permet de calculer des facteurs de caractérisation spécifiques à la nature de la biomasse dans laquelle le carbone est stocké pouvant être appliqués aux émissions de CO₂ biogénique et remplacer le facteur de caractérisation nul des émissions de CO₂ biogénique en approche statique FC=0/0. Dans une version plus avancée (Guest, Bright, et al., 2013), la méthode tient aussi compte du stockage temporaire de carbone biogénique. C'est cette version de la méthode qui est utilisée dans la présente étude de cas. Des facteurs de caractérisation ont été calculés en fonction de deux paramètres :

- la **durée de la rotation de culture** de la biomasse: plus longue est la rotation, plus le carbone reste dans l'atmosphère, plus son impact est important ;
- la **durée du stockage temporaire** : comme dans la méthode précédente, plus le stockage est long, moins le carbone reste dans l'atmosphère, moins il a d'impact.

Sans stockage, une biomasse ayant une période de rotation courte présente des facteurs de caractérisation proches de zéro, ce qui tend vers les résultats qui seraient obtenus en appliquant l'hypothèse de neutralité carbone.

Ces informations permettent de déterminer, à l'aide du Tableau 4-5, le facteur de caractérisation à utiliser pour chaque élément de construction en fonction de sa durée de vie et du type de biomasse utilisé. De nouveaux facteurs de caractérisation peuvent être développés en suivant la méthode détaillée dans l'article original, ou à l'aide d'outils comme celui de Gmünder et al. (2020). Pour cette étude de cas, les facteurs précalculés sont utilisés.

Tableau 4-5: Facteurs de caractérisation GWP_{bio} pour différentes durées de stockage et période de rotation. Extrait de (Guest, Cherubini, et al., 2013).

Table 1 Biogenic global warming potential (GWP_{bio}) factor values tabularized for several rotation/storage period combinations using a 100-year time horizon.

Rotation period (years)	Storage period in the anthroposphere (years)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	0.00	-0.07	-0.15	-0.23	-0.32	-0.40	-0.50	-0.60	-0.71	-0.84	-0.99
10	0.04	-0.04	-0.12	-0.20	-0.28	-0.37	-0.46	-0.57	-0.68	-0.80	-0.96
20	0.08	0.00	-0.08	-0.16	-0.24	-0.33	-0.42	-0.53	-0.64	-0.76	-0.92
30	0.12	0.04	-0.04	-0.12	-0.20	-0.29	-0.38	-0.48	-0.60	-0.72	-0.88
40	0.16	0.09	0.01	-0.08	-0.16	-0.25	-0.34	-0.44	-0.55	-0.68	-0.84
50	0.20	0.13	0.05	-0.03	-0.12	-0.21	-0.30	-0.40	-0.51	-0.64	-0.80
60	0.25	0.17	0.09	0.01	-0.07	-0.16	-0.26	-0.36	-0.47	-0.59	-0.75
70	0.29	0.22	0.14	0.06	-0.03	-0.12	-0.21	-0.31	-0.42	-0.55	-0.71
80	0.34	0.26	0.18	0.10	0.02	-0.07	-0.17	-0.27	-0.38	-0.50	-0.66
90	0.38	0.31	0.23	0.15	0.06	-0.03	-0.12	-0.22	-0.33	-0.46	-0.62
100	0.44	0.37	0.29	0.21	0.12	0.032	-0.06	-0.16	-0.27	-0.4	-0.56

Les facteurs de caractérisation identifiés sont multipliés par les émissions de CO₂ biogéniques pour chaque étape du cycle de vie. Les résultats calculés avec l'approche dynamique sont donc ajoutés aux résultats calculés avec la méthode *IPCC 2021 GWP100 without CO₂ uptake* (disponibles en section 4.2).

Dans cette étude de cas, des émissions de CO₂ biogénique proviennent de très nombreuses étapes et processus du cycle de vie. Deux stratégies sont possibles pour limiter l'effort de collecte des données et d'identification des flux pour lesquels il est possible d'appliquer un facteur de caractérisation GWP_{bio} :

- **Considérer seulement les émissions des processus d'avant-plan**, pour lesquels la période de rotation et le temps de stockage sont connus. Le reste des émissions est négligé. Cette stratégie peut être adoptée si une analyse de contribution montre que les processus d'avant-plan sont les principaux contributeurs aux émissions totales de CO₂ biogénique;
- **Identifier les principaux contributeurs pour chaque étape du cycle de vie et considérer toutes les émissions comme provenant du processus le plus contributeur pour l'attribution du facteur de caractérisation.** Par exemple, dans le présent cas d'étude, le processus de production d'électricité à partir de biomasse (*heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW*) est le principal contributeur pour l'étape d'usage pour les trois scénarios. Un facteur de caractérisation serait identifié pour ce processus uniquement et serait attribué à

l'ensemble des émissions biogéniques de cette étape, qu'elles proviennent ou non de ce processus.

Les résultats obtenus en adoptant la deuxième stratégie sont présentés dans un tableau en Annexe 2, avec les contributions aux émissions totales de CO₂ biogénique de chaque étape du cycle de vie, le processus qui contribue le plus pour chaque étape et le type de biomasse utilisé dans chacun de ces processus, et ce, pour les trois scénarios à l'étude.

Pour le scénario Bois, deux périodes de rotation différentes sont considérées : 100 ans et 40 ans, respectivement pour le bois de feuillu (*hardwood*) et le bois de résineux (*softwood*) utilisés dans les étapes de construction, production des éléments remplacés et fin de vie. Pour le scénario Bambou, la période de rotation du bambou (biomasse sélectionnée pour toutes les étapes du cycle de vie excepté l'usage) est fixée à 5 ans. Le Tableau 4-6 récapitule les facteurs utilisés pour scénario.

Tableau 4-6: Facteurs de caractérisation pour chaque type de biomasse en fonction de la durée du stockage (tirés de (Guest, Cherubini, et al., 2013)).

Période de rotation (année)		Stockage (année)		
		0	30	60
<i>Hardwood</i>	100	0.44	0.21	-0.06
<i>Softwood</i>	40	0.16	-0.08	-0.25
<i>Bambou</i>	5	0.02	-0.21	-0.48

Les résultats de cycle de vie obtenus en appliquant les GWPbio aux émissions sont additionnés aux résultats obtenus avec l'approche FC=0/0 et sont présentés à la Figure 4-18.

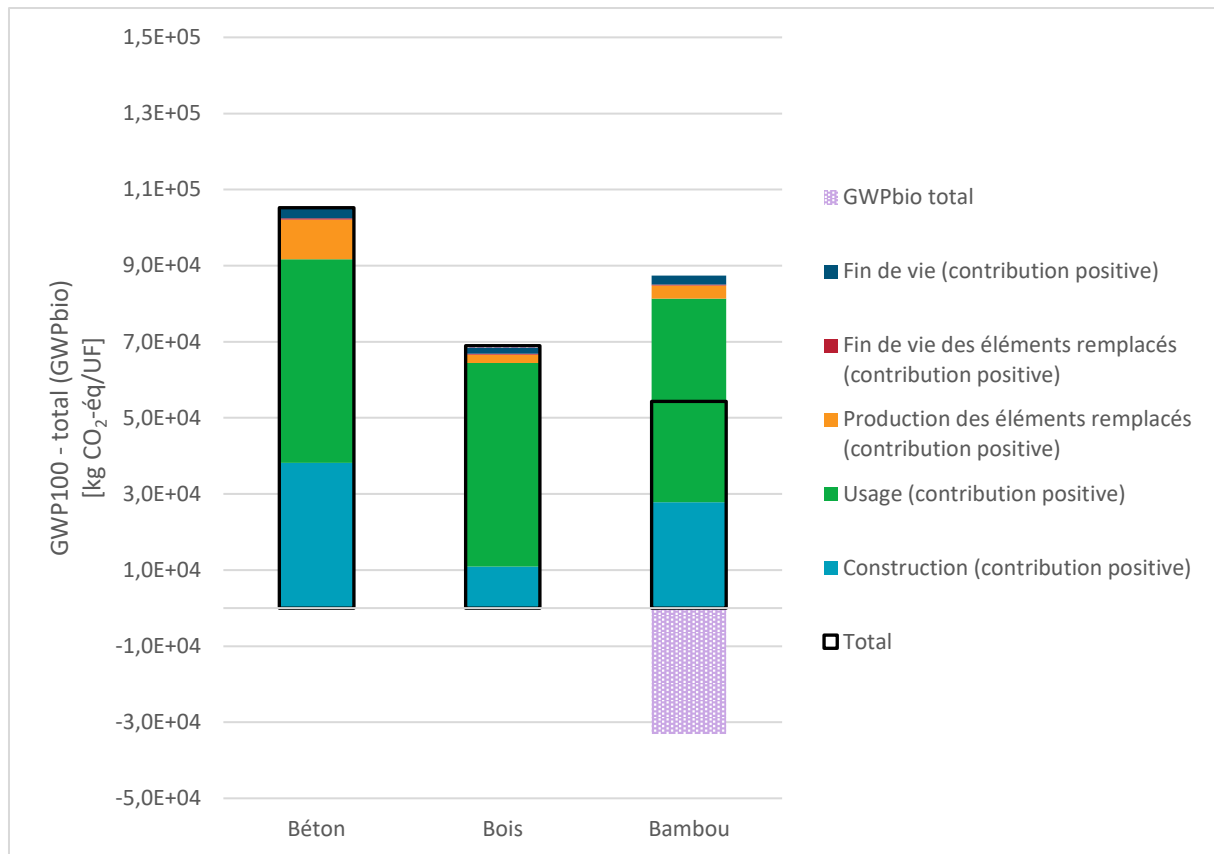


Figure 4-18: Comparaison de résultats avec la méthode GWPbio.

Avec cette approche, seul le scénario Bambou montre une contribution non négligeable (17%) et un résultat négatif. L'approche GWPbio induit une contribution positive pour le scénario Bois. Cela est dû à la période de rotation plus courte du bambou par rapport à celle du bois du scénario Bois.

Cette méthode permet de prendre en compte **le stockage temporaire de carbone et les dynamiques de croissance de la biomasse** à l'impact sur les changements climatiques. Cependant, le fait d'utiliser des facteurs de caractérisation spécifiques pour chaque processus dépendant du type de biomasse et de la durée de stockage demande un effort conséquent de la part du praticien pour la mettre en application.

4.4.3 Méthode de comptabilisation dynamique

Les méthodes de comptabilisation dynamique, comme celle proposée par Levasseur, Lesage, & Margni (2010) ou celle de Ventura (2023), prennent en compte le moment où l'émission a lieu et la dynamique de l'émission dans l'atmosphère. Dans cette étude de cas, la méthode de Levasseur, Lesage, & Margni (2010) est présentée, mais celle de Ventura (2023) s'applique de façon similaire.

Ces méthodes sont basées sur l'approche $FC = -1/+1$. À partir de la modélisation statique dans le logiciel d'ACV, l'inventaire des substances contribuant à l'impact sur le changement climatique est calculé. Pour chaque flux de l'inventaire, il est nécessaire de déterminer les moments de chaque émission. Considérant une durée de vie totale de l'édifice de 60 ans, on considère que les étapes du cycle de vie sont distribuées sur cette période de la manière suivante :

- Année 1 : Construction;
- Années 1 à 60 : Usage;
- Année 30 : Production des éléments remplacés;
- Année 30 : Fin de vie des éléments remplacés;
- Année 60 : Fin de vie du bâtiment.

Pour simplifier, on estime que toutes les émissions liées à une étape ont lieu en même temps. Une désagrégation plus fine, qui prendrait en compte qu'une partie des émissions de l'étape de construction aient lieu avant (ex : extraction de ressources) ou après (croissance de la biomasse) l'année de la construction, pourrait être effectuée, mais demanderait plus de travail au praticien. Seuls les principaux GES (CO₂, CH₄ et N₂O) sont considérés. La différenciation entre le carbone émis et capté permet de les visualiser de manière séparée dans les résultats. L'inventaire obtenu pour le scénario Bambou est donné dans l'Annexe 2.

Cet inventaire est ensuite entré dans l'outil dynCO₂, outil *excel*, qui permet de calculer, pour chaque pas de temps (années), l'effet des émissions ayant lieu à une année donnée et l'effet cumulé des émissions des années précédentes, qui sont déjà partiellement dégradées.

L'outil calcule pour chaque année :

- **l'impact instantané (en W/m²)**, qui représente l'augmentation de forçage radiatif dû aux GES présents dans l'atmosphère cette année;
- **l'impact cumulatif (en W/m²)**, qui tient compte de l'impact instantané des années précédentes et de l'impact instantané, et;
- **l'impact relatif (en kg CO₂ eq)**, correspondant au ratio de l'impact cumulatif total pour cette année divisé par celui de l'émission d'un kg de CO₂ émis à l'année 1.

Ce dernier résultat permet de fixer un horizon et calculer un résultat total en kg CO₂ eq pour obtenir un résultat dans les mêmes unités que celui obtenu avec les autres méthodes. Cependant, en fixant un horizon temporel, les émissions et leur impact ne sont plus considérés à partir de cette année, ce qui résulte en un impact total plus faible que celui obtenu avec l'approche statique. Ainsi, il est davantage intéressant d'observer les courbes sans fixer d'horizon temporel avec cette approche.

La Figure 4-19 montre l'impact instantané pour les premiers 500 ans calculé pour le scénario Bambou. L'impact varie en fonction des différentes étapes du cycle de vie, notamment pendant la construction du bâtiment (émissions et séquestration considérées à l'année 1) et pendant les premiers 60 ans (durée de vie du bâtiment). L'impact de ces émissions et l'impact négatif lié à la séquestration décroissent au cours des années suivantes. À l'année 30, la fabrication de nouveaux éléments de remplacement et la fin de vie des anciens engendrent une séquestration supplémentaire et des émissions supplémentaires. À l'année 60, le pic d'émissions est dû à l'incinération en fin de vie de l'ensemble des éléments de construction. À partir de l'année 60, les GES déjà présents dans l'atmosphère ont un impact instantané qui décroît grâce à leur dégradation progressive.

La Figure 4-20 montre l'évolution de l'impact instantané sur les 500 premières années des trois scénarios, et la Figure 4-21 l'évolution de l'impact instantané cumulatif sur les 1000 premières années. Selon la seconde figure, les scénarios Bois et Bambou présentent un avantage par rapport au scénario Béton, mais les différences entre les scénarios Bois et Bambou sont faibles.

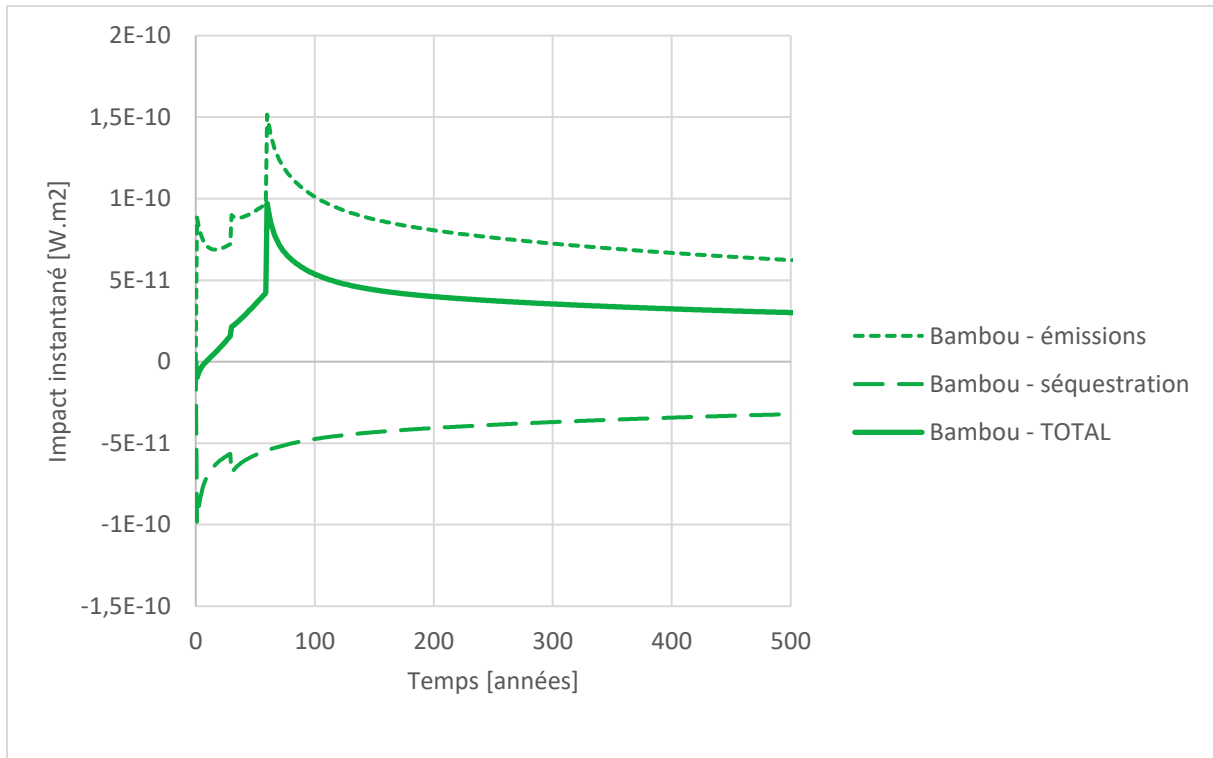


Figure 4-19: Résultats avec la méthode Levasseur (outil dynCO₂) pour le scénario Bambou. Impact instantané ($W \cdot m^2$).

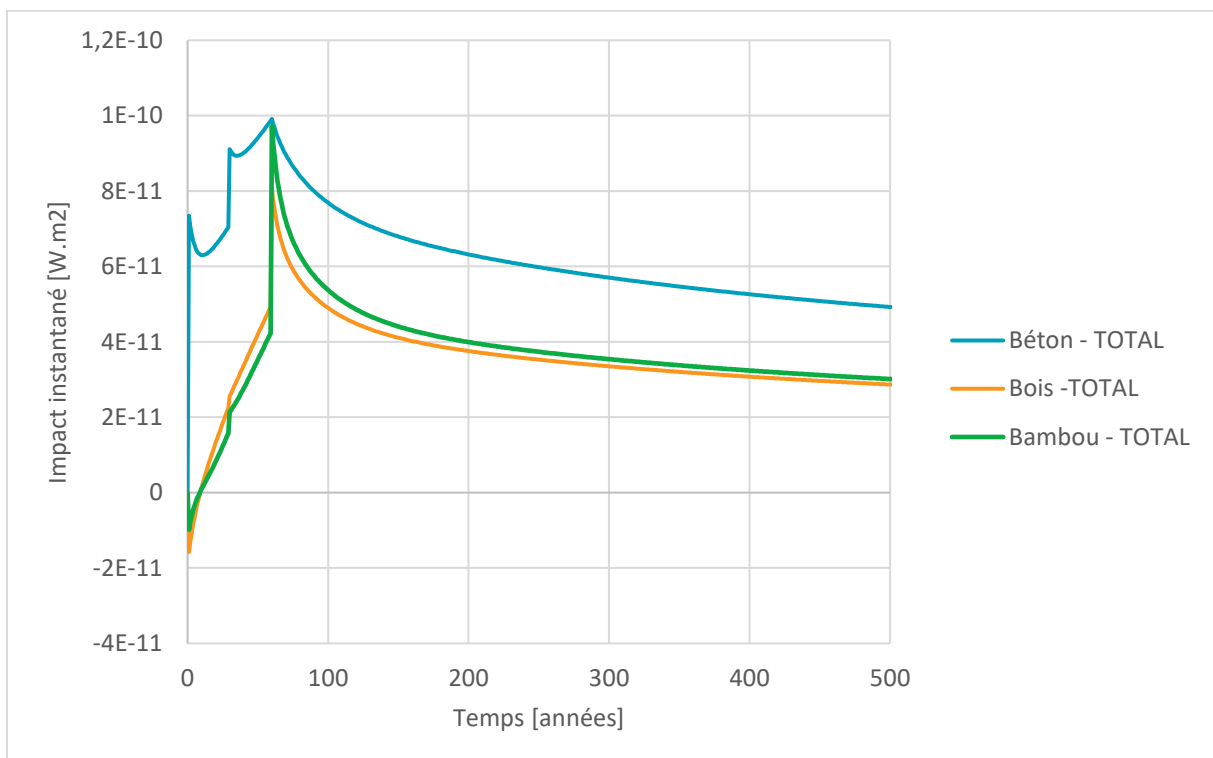


Figure 4-20: Résultats avec la méthode Levasseur (outil dynCO₂) pour les trois scénarios. Impact instantané ($W \cdot m^2$).

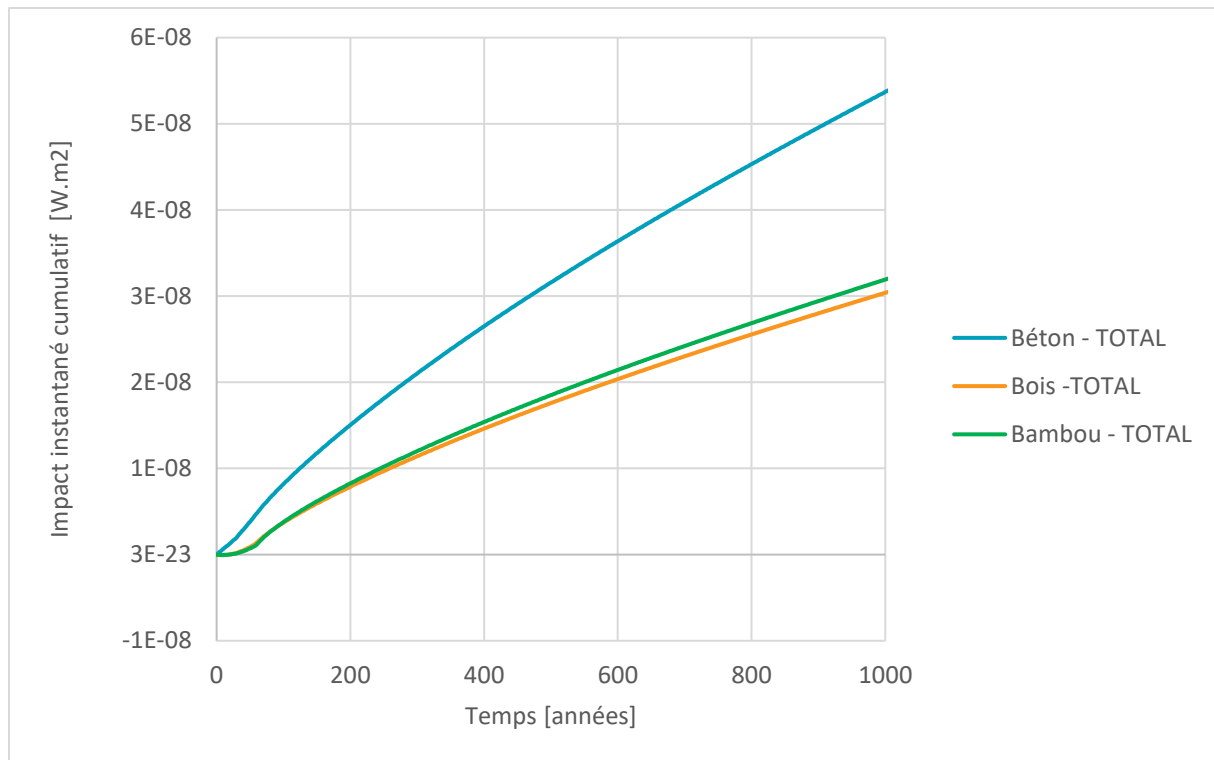


Figure 4-21: Résultats avec la méthode Levasseur (outil dynCO₂) pour les trois scénarios. Impact instantané cumulé ($W.m^2$).

Cette méthode permet de bien visualiser l'impact instantané causé par une émission ou une séquestration au cours du temps, et l'impact cumulé résultant de l'ensemble des émissions présentes et passées au cours du temps. Elle permet de tracer des courbes qui tiennent compte tant de la dynamique de l'inventaire que de l'évolution de l'impact sur le changement climatique dans le temps. Les effets de stockage temporaire et de la croissance de la biomasse sont par défaut considérés avec cette méthode si l'inventaire est suffisamment détaillé et les courbes de croissance de la biomasse connues. Dans cette étude de cas, certaines hypothèses simplificatrices ont été utilisées concernant la croissance de la biomasse ou les émissions en arrière-plan.

Le principal aspect négatif de cette méthode est la charge de travail additionnelle qu'elle demande au praticien pour distribuer l'inventaire dans le temps de façon suffisamment détaillée. L'utilisation de l'outil *excel* dynCO₂ aide à calculer les résultats, mais les facteurs dynamiques peuvent aussi être calculés manuellement.

4.5 Usage et transformation des terres (LULUC)

Dans la présente étude de cas, la contribution des LUC (sous-indicateur GWP100 – land transformation) à l'impact sur les changements climatiques est très faible (voir Figure 4-5 (approche FC=0/0) ou Figure 4-8 (approche FC=-1/+1), la contribution étant indépendante de l'approche choisie). Cette section vise à expliquer comment l'impact sur les changements climatiques des LUC est modélisé dans la base de données *ecoinvent*, et à montrer à quel point il peut être significatif selon le cas étudié.

4.5.1 Prise en compte des LULUC dans la base de données *ecoinvent* pour l'impact sur les changements climatiques

En 2007, *ecoinvent* v2.2 est la première version de la base de données qui inclut des LUC. Cependant, ils ne sont inclus que pour le soja et le fruit du palmier à huile, deux produits pour lesquels la déforestation était un enjeu important. Pour cette première approche, la méthodologie n'était pas encore

aboutie et n'était pas cohérente en termes de cadre temporel, l'ensemble des compartiments de carbone n'était pas considéré et seule la transformation à partir de la forêt primaire était prise en compte (Donke et al., 2020).

La modélisation des LUC est mise à jour dans la version 3.2, en intégrant les recommandations de la norme PAS 2050 (2011) (calcul basé sur l'expansion des cultures, amortissement sur 20 ans de l'impact) et tous les compartiments de carbone mentionnés par le GIEC sont considérés. Une nouvelle structure de flux est mise en place pour pouvoir intégrer les LUC à tous les processus, mais ils sont seulement intégrés pour la canne à sucre, le soya et le fruit du palmier à huile dans un premier temps. Finalement, l'intégration de jeux de données de la *World Food Life Cycle Inventory Database (WFLDB)* à *ecoinvent* dans la version 3.3 donne une opportunité pour inclure les LUC dans davantage de processus (Donke et al., 2020).

Le développement des LUC a souvent d'abord été fait pour le Brésil, car l'agriculture est une activité économique importante et émettrice (42% issus des LUC en 2010) dans ce pays. (Donke et al., 2020; Novaes et al., 2017). Tous les calculs pour intégrer l'impact sur les changements climatiques des LUC dans la base de données *ecoinvent* sont réalisés avec un outil développé par Blonk Consultants en 2013 et adapté par Quantis pour la WFLDB, et son utilisation pour l'intégration des LUC à *ecoinvent* est détaillée dans la documentation de Reinhard et al. (2017).

L'outil permet de déterminer combien et quel type de LUC est attribué à une certaine culture dans une certaine région géographique. Ainsi, l'outil permet à la fois de quantifier les LUC et de les allouer selon la culture et le lieu.

Le calcul des LUC est basé sur des statistiques d'utilisations des terres de la FAO (FAOSTAT) de 1991 à 2010 pour la production agricole et les terres naturelles dans tous les pays du monde, incluant aussi les climats et les types de sols en utilisant les statistiques EU-JRC 2010c (Nemecek et al., 2019).

L'outil est basé sur les principes méthodologiques de la PAS 2050 (2011), du GHG Protocol (2011) et de ENVIFOOD pour déterminer l'expansion des terres utilisées, et considère une période d'amortissement de 20 ans. Comme dans la PAS 2050 (2011), l'outil offre trois approches différentes pour le calcul selon les données disponibles :

1. « **Pays connu, utilisation des terres inconnue** » : on estime les émissions de GES à partir de scénarios de référence, combinés avec des données de la FAOSTAT sur les expansions des cultures.
2. « **Pays et utilisation des terres inconnus** » : les émissions de GES sont estimées avec une moyenne pondérée, avec la même approche que 1).
3. « **Pays et utilisation des terres connu** »

Dans *ecoinvent*, l'approche 1) est utilisée pour les processus avec une géographie connue et l'approche 2) pour les processus avec une géographie globale (« GLO »).

Quatre compartiments de carbone sont considérés et correspondent à ceux du GIEC : biomasse aérienne (*above-ground biomass (AGB)*), biomasse souterraine (*below-ground biomass (BGB)*), matière organique morte (*dead organic matter (DOM)*) qui englobe les deux compartiments litière et bois mort, et le carbone organique du sol (*soil organic carbon (SOC)*).

Le terme « occupation » est utilisé dans le document de Weidema B P et al. (2013) pour désigner ce qui est appelé dans le présent rapport le **changement de gestion des terres** (et **non l'occupation des terres**) qui influence le compartiment SOC (voir les définitions des termes liés aux LULUC à la section 2.3.3).

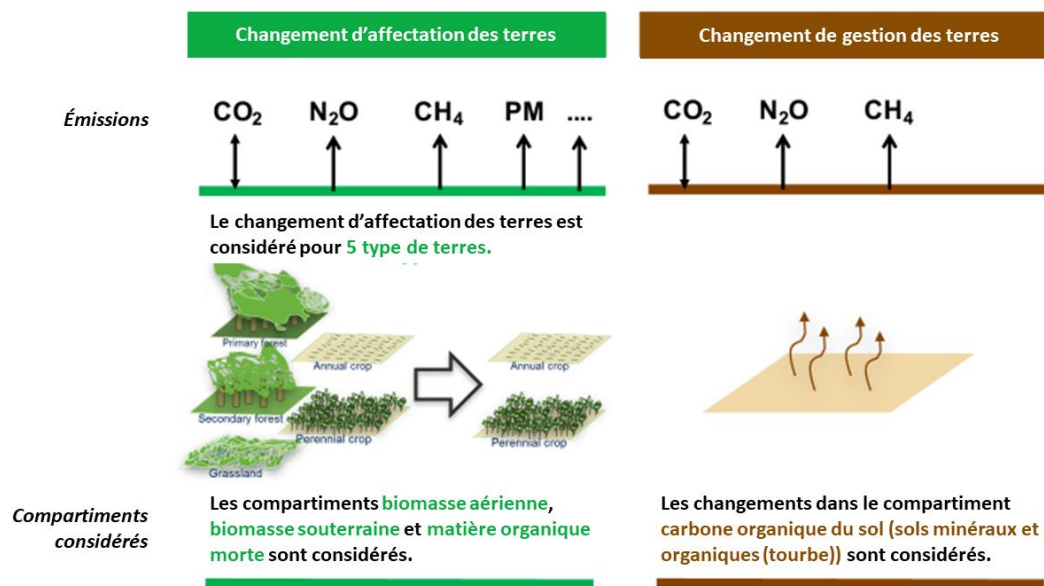


Figure 4-22 : Description du processus modélisant l'impact sur les changements climatiques liés aux LULUCs (traduite et adaptée de Reinhard et al. (2017) en utilisant le vocabulaire défini dans ce document).

Les impacts sont ajoutés sous la forme **d'une chaîne de processus délivrant un flux économique** où la contribution des LULUC aux changements climatiques est décomposée de la manière suivante (Figure 4-22 : Description du processus modélisant l'impact sur les changements climatiques liés aux LULUCs (traduite et adaptée de Reinhard et al. (2017) en utilisant le vocabulaire défini dans ce document).Figure 4-22) :

- **Les activités liées au changement d'affectation des terres** modélisent la transformation de cinq types de terres (forêts primaires, forêts secondaires, prairies, terres pérennes et terres annuelles) en deux types d'utilisations des terres (cultures annuelles ou pérennes. Ces activités modélisent les variations des stocks de carbone dans la biomasse vivante et morte (perte ou accumulation de carbone)
- **Les activités liées au changement de gestion des terres** modélisent les changements dans le carbone organique du sol, c'est-à-dire dans les sols minéraux et organiques (tourbe)

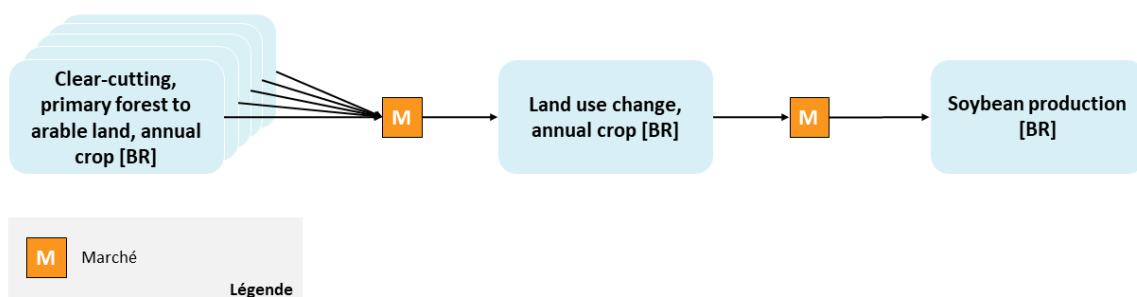


Figure 4-23 : Exemple de modélisation de l'impact sur les changements climatiques du processus de production de fèves de soya (reproduit de Reinhard et al. (2017)).

La Figure 4-23 détaille la chaîne de processus qui modélisent l'impact sur l'utilisation des terres pour un exemple : la production de fèves de soya au Brésil (processus *soybean production [BR]*).

- **Le processus *Clear cutting, primary forest to arable land, annual crop* est lié au changement d'affectation des terres.** Il modélise les émissions et séquestrations de GES associés et causés par la transformation des terres, et produit le flux *land tenure*, exprimé en kg de carbone par mètre carré et par an ($\text{kgC}/(\text{m}^2.\text{an})$), unité également appelée production primaire nette (*Net Primary Productivity (NPP)*). Cette quantité correspond à la quantité de carbone nette produite pour 1 m² de terres transformées par an. Dans l'exemple, une forêt est coupée et remplacée par une terre arable pour une culture annuelle.
- **Le processus *Land use change, annual crop [BR]* est lié au changement de gestion des terres** et inclue d'une part l'amortissement (sur 20 ans) des impacts des processus en amont et d'autre part les émissions et absorptions liées au changement de gestion des terres, c'est-à-dire liées au réservoir de carbone organique dans le sol (SOC). Le processus produit un flux de *land use change, annual crop* qui est en hectares.

Encadré 6 : Flux d'occupation et de transformations des terres dans *ecoinvent*

Les flux d'inventaire :

- **d'occupation des terres (en m².année)**, qui désignent une activité qui occupe un espace pendant un certain temps ;
- **de changement d'utilisation des terres (en m²)**, qui désignent un espace que l'on transforme en précisant l'état de départ (flux *from...*) et l'état d'arrivée (flux *to...*) ;

ne contribuent pas aux impacts sur les changements climatiques. Ces flux sont caractérisés uniquement au niveau des indicateurs d'utilisation des terres (problème) et au niveau des indicateurs relatifs à la biodiversité (dommage). La contribution aux changements climatiques liée aux LULUC est ultimement toujours directement modélisée par des flux élémentaires de GES (CO₂, N₂O, CH₄...), calculés selon différentes méthodes.

4.5.2 Enjeux des LULUC appliqués à un exemple

Un processus ne faisant pas partie de l'étude de cas est choisi ici comme exemple pour montrer comment adapter un processus présent dans *ecoinvent* à un contexte donné. Un cas simple de culture de palmier pour la production d'huile de palme en Indonésie est considéré. L'étape agricole et notamment les émissions dues aux LULUC qui en sont issues sont identifiées par plusieurs auteurs comme étant la principale contribution aux impacts sur les changements climatiques (Barthel et al., 2018; Bessou et al., 2014). Il est donc nécessaire d'ajuster ces émissions selon les données disponibles lorsque la situation le permet.

Le processus disponible dans *ecoinvent* est une moyenne de la production de fruits du palmier, détaillée dans la Figure 4-24. Les flux de *Land tenure, perennial crop* et *Land use change* représentent la moyenne des cultures de fruit du palmier dans le pays, avec les émissions de GES dues au changement d'affectation des terres (incluant les changements de pratiques de gestion, comme l'assèchement de

tourbières) et au changement de gestion des terres. Le flux net de carbone est positif (émission) pour des transformations où le stock de carbone dans la biomasse et le sol diminuent, ou négatif (stockage dans le sol et la biomasse) pour des transformations où le stock de carbone dans la biomasse augmente (par exemple, c'est le cas pour la transformation de *grassland* à *perennial crop*)

La transformation de terres (*Land tenure, perennial crop*) est un marché représentatif de la situation du pays pour les cultures pérennes avec deux principaux types de terres transformées : la transformation à partir de forêt secondaire, qui représente un 42 % du total, et la transformation d'une culture pérenne en une autre, qui représente un 45 % du total.

La quantité du processus *land tenure, perennial crop* est définie selon la productivité primaire nette du marché. Si le marché varie, la quantité de NPP doit varier en conséquence.

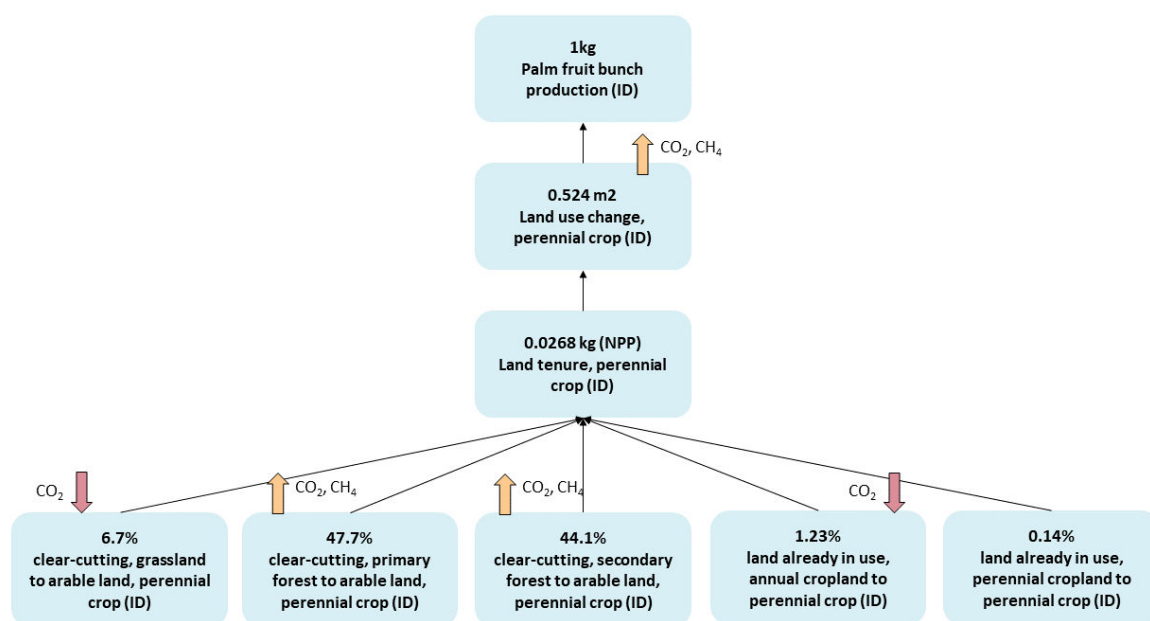


Figure 4-24 : Modélisation de la transformation de terres pour la production d'un kilogramme de fruit de palmier.

Dans le cas où des données primaires sur l'étape agricole seraient disponibles, plusieurs éléments doivent être adaptés :

- **La proportion des différents types de changement d'affectation des terres** dans le marché ;
- **La NPP** que les terres transformées produisent ;
- **Les émissions dues aux changements de pratiques de gestion des terres.**

Avec une production durable respectant par exemple les normes de la Table ronde sur l'huile de palme durable (RSPO), les terres utilisées pour une nouvelle culture ne seraient pas bien représentées par le marché par défaut, et le changement de gestion des terres serait également affecté en limitant ou en évitant complètement l'assèchement de tourbières. Le Tableau 4-7 résume les données et hypothèses utilisées pour l'exemple :

- Le type de terre transformé proviendrait uniquement de terres déjà cultivées qui sont transformées en culture de palmier à fruits ;

- La NPP calculée pour la moyenne de la région dans *ecoinvent*, qui provient de (Haberl et al., 2007), serait remplacée par la NPP moyenne des cultures, à partir des données de Monfreda et al. (2008). Comme c'est le cas dans les processus *ecoinvent*, la NPP est amortie sur les 20 ans suivant la transformation. L'incertitude de cette donnée étant élevée, deux scénarios alternatifs sont modélisés : le premier conserve la valeur de NPP par défaut disponible dans *ecoinvent*, et le second prend la valeur de la littérature.
- Les émissions dues aux changements de gestion des terres sont mises à zéro pour le scénario alternatif. L'hypothèse est que la gestion durable définie dans la norme RSPO interdit certaines pratiques comme l'assèchement de tourbières. À des fins de simplification, le stockage dans le réservoir de carbone du sol est considéré comme nul.

Tableau 4-7: Données et hypothèses utilisées

	Moyenne <i>ecoinvent</i> (référence)	Production durable (même NPP)	Production durable (NPP modifiée)	Source
Type de terre transformée	Marché indonésien	<i>land already in use, annual cropland to perennial crop</i>	<i>land already in use, annual cropland to perennial crop</i>	Hypothèse (RSPO)
NPP (kg/ha.année)	511 (moyenne du pays)	511 (moyenne du pays)	275	Hypothèse (Monfreda et al., 2008)
Émissions dues aux pratiques de gestion	Assèchement de tourbières	Limitées, pas d'assèchement	Limitées, pas d'assèchement	Hypothèse (RSPO)
CO ₂ (kg/ha)	2210	0	0	
CH ₄ (kg/ha)	6.98	0	0	
N ₂ O (kg/ha)	1.05	0	0	

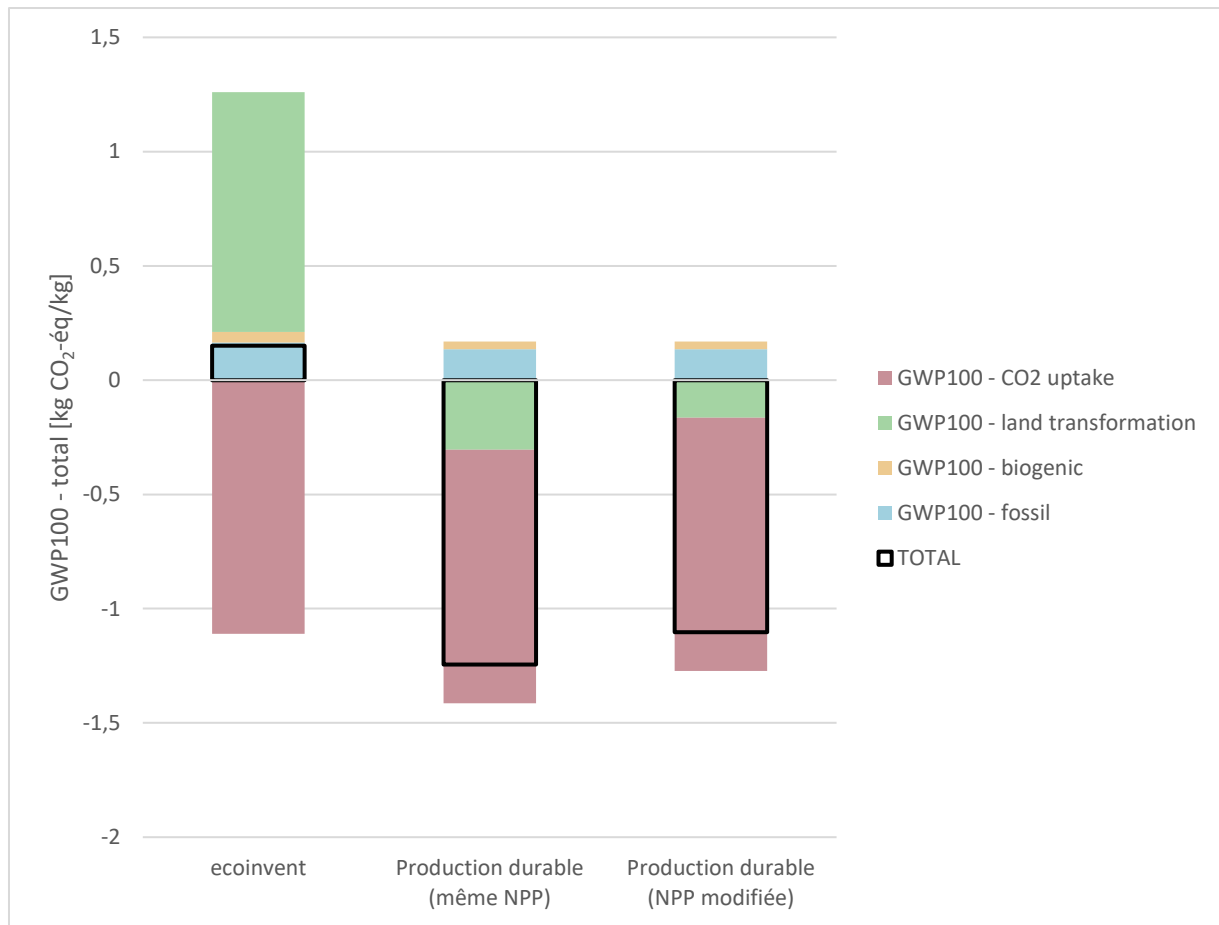


Figure 4-25 : Comparaison des scénarios pour la production de fruit du palmier en Indonésie (GWP100).

La Figure 4-25 montre la comparaison des trois scénarios : le scénario moyen d'*ecoinvent* (référence) et les deux scénarios alternatifs dont la valeur de NPP varie. Avec les modifications proposées, les résultats varient fortement. Le résultat total devient négatif pour les scénarios alternatifs. Les émissions liées à la transformation de terres s'avèrent être le principal contributeur à ce changement : la transformation résulte en une augmentation du stockage dans le sol et la biomasse dans les scénarios alternatifs, ce qui n'était pas le cas pour les scénarios de base. La modification des émissions dues aux pratiques de gestion des terres contribue aussi à la catégorie *GWP100 - land transformation* (assèchement de tourbières), alors que la variation de la NPP, n'a pratiquement pas d'influence.

D'autres processus dans *ecoinvent* et dans les autres bases de données renseignent directement les émissions dues aux LULUC sans passer par la structure de *land use change* et *land tenure* utilisée dans cette étude de cas. Dans ce cas, les changements passent directement par le calcul des stocks de carbone avant et après la transformation et la modification des émissions dans le processus de production agricole.

5. Conclusions et recommandations

5.1 Synthèse des enjeux traités et recommandations

5.1.1 Approche de comptabilité

Deux approches de comptabilisation du carbone biogénique sont majoritairement considérées et mises en application en ACV : l'approche **FC=0/0** et l'approche **FC=-1/+1**.

- **L'approche FC=0/0** est bâtie sur l'hypothèse de neutralité carbone : l'impact d'une émission de CO₂ biogénique est considéré compensé par la séquestration rapide d'une quantité équivalente de CO₂ via photosynthèse. Son utilisation répandue découle notamment d'une erreur causée par l'application hors contexte des lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de GES (Levasseur & Brandao, 2014).
- **L'approche FC=-1/+1** considère que les flux de carbone biogénique ont le même impact que les flux de carbone fossile : un crédit est comptabilisé lors de la séquestration, et un impact lors de l'émission.

En général, la simplicité de l'approche FC=0/0 en a fait une méthode couramment utilisée dans les outils ACV, notamment dans les méthodes de caractérisation. Néanmoins, l'hypothèse de neutralité carbone n'est pas toujours vérifiée et des ajustements des facteurs de caractérisation sont nécessaires avec l'approche FC=0/0 pour la prise en compte des émissions de CH₄ et CO biogéniques ainsi que pour le stockage permanent. La méthode FC=-1/+1 permet de capturer l'ensemble des impacts (et crédits) de manière cohérente, mais son utilisation soulève des enjeux opérationnels liés à la modélisation des flux contenant du carbone biogénique entrants, sortants et à l'intérieur du système de produit.

Les exigences réglementaires et les acteurs publics **convergent vers l'utilisation de l'approche FC=-1/+1**. Cependant, en pratique, l'approche FC=0/0 est encore aujourd'hui largement utilisée.

Synthèse des recommandations

Approche de comptabilité

Recommandations générales

Le carbone biogénique étant le même atome et ayant les mêmes impacts que le carbone fossile, il ne devrait pas être traité différemment en ACV.

- Toujours prioriser l'approche $FC=-1/+1$.
- L'approche $FC=0/0$ peut être utilisée pour des systèmes où les produits biosourcés ne sont pas l'objet de l'étude ou si les flux de carbone biogéniques ne contribuent pas significativement à l'impact final.

Recommandations pour les praticiens

- S'assurer que l'inventaire des flux de carbone biogénique est complet.
- Ajuster le bilan de carbone biogénique en cas de déséquilibre, en priorisant l'avant plan et les processus les plus contributeurs.
- Utiliser des bases de données qui incluent l'ensemble des flux de carbone biogéniques (séquestration et émissions de GES biogéniques).
- Utiliser des bases de données désagrégées pour accéder aux flux de carbone biogénique (et éventuellement les corriger) dans les processus.

Recommandations pour les bases de données

- Inclure l'ensemble des flux de carbone biogénique (conservation de la masse).

5.1.2 Suivi des flux de carbone : choix de frontières du système, multifonctionnalité et traçabilité (*mass-balance*)

Des enjeux de comptabilisation du carbone biogénique liés au choix des frontières du système, à la multifonctionnalité et à la traçabilité (*mass-balance*) apparaissent quand l'approche de comptabilisation FC=-1/+1 est utilisée.

Le contenu carbone des produits est une information essentielle pour assurer le suivi des flux de carbone au sein du système et entre les systèmes, et pouvoir utiliser l'approche FC=-1/+1

- **Choix des frontières du système** : les ACV qui n'incluent pas l'ensemble des étapes du cycle de vie (particulièrement les étapes pendant lesquelles le carbone biogénique est séquestré et émis) peuvent résulter en une interprétation faussée des résultats. Des résultats obtenus avec une ACV « du berceau à la porte » ou « de la porte au tombeau » peuvent respectivement conduire à sous-estimer ou à surestimer l'impact d'un produit sur les changements climatiques.
- **Multifonctionnalité** :
 - Une allocation des co-produits non basée sur le contenu en carbone biogénique des produits perturbe le bilan des flux de carbone biogénique à l'échelle des processus. Une correction de ces bilans peut être faite à la main pour les processus d'avant-plan, et dans les bases de données pour les processus d'arrière-plan.
 - L'approche *cut-off* attribue les impacts des flux de carbone biogénique des sous-produits et déchets entrants ou sortants aux cycles de vie respectivement en amont ou en aval du cycle de vie considéré. En excluant des processus du système de produit pouvant potentiellement séquestrer ou émettre du carbone biogénique, le bilan des flux de carbone biogénique est perturbé à l'échelle du système.
 - Les principales normes et guidelines recommandent l'ajustement des flux de carbone quand le type d'allocation utilisé altère le bilan de carbone biogénique.
- **Traçabilité (*mass-balance*)** :
 - Il existe quatre modèles de chaînes de traçabilité pour lier des entrants à un produit final sortant.
 - Tous les modèles peuvent être mis en place, mais la transparence, la standardisation des pratiques et le contrôle de la part d'entités indépendantes sont nécessaires pour garantir le bon fonctionnement du modèle.
 - L'utilisation d'un contenu en carbone certifié ne reflète pas nécessairement le contenu en carbone biogénique réel du produit, mais permet de récompenser les choix et efforts des acteurs engagés.
 - Les acteurs et normes qui traitent ce sujet sont peu nombreux et ne concluent pas sur le modèle le plus approprié, mais davantage sur le besoin de documenter de façon transparente les choix de modélisation.

Synthèse des recommandations

Suivi des flux de carbone : choix de frontières du système, multifonctionnalité et traçabilité (*mass-balance*)

Recommandations générales

- Le traitement de la multifonctionnalité doit être ajusté pour le carbone biogénique (allocation selon le contenu en carbone biogénique ou correction).
- Le choix de la méthode pour la traçabilité n'affecte pas le bilan de carbone final. Cependant, la traçabilité des flux et la documentation sont nécessaires pour le calcul de ces bilans.

Recommandations pour les praticiens

- Considérer l'ensemble des étapes du cycle de vie impliquant une séquestration ou des émissions de carbone biogénique. À défaut, explicitement mettre en évidence l'influence du choix des frontières du système sur les résultats et leur interprétation.
- Calculer et vérifier le bilan de carbone biogénique.
- Utiliser des bases de données qui corrigent les problèmes liés à l'allocation (de co-produits et *cut-off*).
- Ajuster manuellement les déséquilibres issus de la multifonctionnalité (co-produits et *cut-off*).
- Dans le cas d'une expansion des frontières, considérer l'ensemble des étapes du cycle de vie impliquant une séquestration ou des émissions pour le système substitué.
- L'utilisation de contenu en carbone biogénique réel ou certifié doit être documentée de façon transparente tout au long de la chaîne de valeur du produit.

Recommandations pour les bases de données

- Inclure le contenu en carbone biogénique pour l'ensemble des flux
- Inclure des flux de correction pour l'arrière-plan (allocation de co-produit et *cut-off*).
- Paramétrer les processus en fonction du contenu en carbone biogénique des flux entrants ou sortants.
- Faciliter le suivi du carbone biogénique dans le système (ex. permettre une analyse de flux de matière du carbone biogénique).

5.1.3 Aspects temporels et stockage

Le calcul de l'impact sur les changements climatiques dépend notamment de deux paramètres :

- **l'horizon temporel** choisi pour comptabiliser les émissions et calculer les impacts. En ACV statique, il est généralement fixé à 100 ans ;
- **le moment où le flux élémentaire** est émis ou absorbé. En ACV statique, tous les flux élémentaires sont supposés émis ou absorbés à $t=0$.

De plus, deux enjeux principaux sont plus spécifiquement liés à la dynamique de la comptabilisation des flux de carbone biogéniques en ACV :

- la dynamique **entre la captation et l'émission du carbone**, liée au cycle de la croissance de la biomasse. Plus la biomasse repousse lentement, plus la séquestration est longue, plus le carbone reste dans l'atmosphère et a un impact ;
- la question du **stockage** (temporaire ou permanent) de carbone dans les matériaux et produits. Le **stockage temporaire** de carbone correspond à la rétention du carbone hors de l'atmosphère pendant un certain temps. Il est parfois associé à un crédit environnemental (impact évité). Le **stockage permanent** correspond à une émission qui a lieu au-delà de l'horizon temporel choisi, et qui n'est donc pas considérée dans l'ACV.

Plusieurs méthodes **dynamiques** existent pour tenir compte des aspects temporels et de stockage.

- Certaines méthodes, appelées **dynamiques sélectives** dans ce rapport, permettent de prendre en compte les aspects dynamiques spécifiquement liés aux flux de carbone biogénique et sont combinées avec l'ACV statique, mais présentent des incohérences d'un point de vue méthodologique.
- Les approches de comptabilisation **dynamiques** considèrent l'ensemble des paramètres dynamiques pour l'ensemble de l'inventaire (flux biogéniques et non biogéniques), mais requièrent un effort supplémentaire de collecte de données et l'utilisation d'outils spécifiques. Les approches dynamiques permettent de visualiser l'évolution de l'impact dans le temps. Les résultats obtenus ne sont pas facilement comparables avec ceux des approches statiques, mais donnent une information supplémentaire pour la prise de décision.

En général, les normes et praticiens **ne considèrent pas les approches dynamiques en ACV** en raison du manque de consensus quant à l'approche à adopter, la difficulté de leur mise en œuvre et la complexité de leur interprétation. **Excepté le stockage temporaire**, qui est **parfois considéré** avec des approches dynamiques sélectives.

Synthèse des recommandations

Aspects temporels et stockage

Recommandations générales

- Réaliser une ACV dynamique uniquement si pertinent dans le contexte de l'étude (ex. dans le cas d'un stockage temporaire important ou de cycles de rotation de la biomasse longs).
- Prioriser les approches dynamiques plutôt que les approches dynamiques sélectives, qui gardent une cohérence pour tous les flux d'inventaire.
- Poursuivre le développement et la mise à jour des facteurs de caractérisation, des approches et des outils d'ACV dynamiques.

Recommandations pour les praticiens

- Déterminer la pertinence de l'approche avec une analyse de contribution et un bilan du carbone mobilisé et stocké temporairement.
- Construire un inventaire dynamique (quelle émission à quel moment) de façon itérative pour trouver l'équilibre entre le niveau de détail et le temps passé pour la modélisation.
- Présenter séparément les contributions obtenues en utilisant les méthodes dynamiques sélectives (tonne.année, GWPbio).
- Présenter et interpréter les résultats obtenus en utilisant les approches dynamiques sans les comparer à ceux de l'ACV statique.

Recommandations pour les bases de données

- Intégrer de l'information temporelle sur les flux quand pertinente (durée de vie, période de rotation de la biomasse, chronologie des flux ...).
- Développer des données spécifiques sur la dynamique de croissance de la biomasse (particulièrement pour le bois).
- Permettre la construction d'un inventaire dynamique
- Intégrer la possibilité de faire des ACV dynamiques directement au sein des logiciels d'ACV.

5.1.4 Usage et transformation des terres

Le **carbone biogénique** stocké dans le sol et la végétation sont affectés par l'usage et la transformation des terres (couramment désigné par l'abréviation anglophone de **land use and land use change, LULUC**).

- Deux types d'activité sont différenciés : l'**occupation des terres** (maintenir un usage à une certaine intensité pendant un certain temps) et le **changement d'utilisation des terres**, qui comprend le changement d'affectation des terres (convertir une terre d'un usage vers un autre) et le changement de gestion des terres (changement de pratique agricole ou forestière).
- Deux types de LUC sont différenciés : les **LUC directs** (dLUC, causés directement par les terres qui sont occupées et/ou transformées par le système de produit étudié) et les **LUC indirects** (iLUC, causés à l'extérieur du système étudié par des mécanismes de marché). Des deux, **seuls les dLUC sont généralement comptabilisés**.
- Les LULUC exercent une influence sur les changements climatiques, la qualité des sols et la biodiversité. L'enjeu de comptabilisation des émissions des LULUC pour l'impact sur les changements climatiques est lié à la **quantification des émissions au niveau de l'inventaire**. Ces émissions contribuent ensuite à l'impact sur les changements climatiques de la même façon que les autres émissions dans l'inventaire.
- La plupart des modèles pour quantifier les émissions liées aux LULUC sont basés sur l'approche du GIEC (IPCC Tier 1). Cependant, une autre approche est recommandée par la Life Cycle Initiative (GLAM) : l'approche Müller-Wenk et Brandão.

En général, les normes et guides **recommandent de traiter le carbone émis à la suite d'un changement d'utilisation de terres comme du carbone fossile**.

Synthèse des recommandations

Usage et transformation de terres

Recommandations générales

- Si possible, inclure les impacts de l'occupation et la transformation des terres sur le changement climatique.
- Choisir l'outil le plus pertinent pour identifier les LUC en fonction des ressources allouées à l'étude.
- Si possible, inclure les changements de gestion des terres lors de l'évaluation des impacts des LUC.
- Inclure les iLUC si requis, en fonction du contexte de l'étude.

Recommandations pour les praticiens

- Utiliser des bases de données qui incluent les émissions des LUC.
- Utiliser des bases de données désagrégées qui permettent l'adaptation des processus au contexte de l'étude.
- Si possible, adapter les processus des bases de données avec des données spécifiques à l'étude.

Recommandations pour les bases de données

- Paramétriser et désagréger les données pour calculer les émissions des LUC, et les documenter de manière claire.
- Suivre l'évolution de la recherche sur le calcul et l'inclusion des iLUC.

5.2 Conclusion

Cette étude, menée par le CIRAIG et mandatée par l'association ScoreLCA, visait à analyser les approches de comptabilisation des GES biogéniques en ACV, identifier les enjeux méthodologiques et formuler des recommandations.

L'état de l'art a révélé les enjeux et le manque d'harmonisation des pratiques actuelles, en particulier pour les approches « FC = 0/0 » et « FC = -1/+1 ». Les études de cas ont démontré leurs avantages, inconvénients et défis opérationnels.

L'étude a également exploré les approches dynamiques et les défis liés à la quantification des flux de GES issus de l'usage et de la transformation des terres. Une compréhension approfondie de ces dimensions est cruciale pour appréhender l'étendue des problématiques liées à la comptabilisation des GES biogéniques.

Les recommandations visent à guider les praticiens, développeurs de logiciels et instances normatives vers l'harmonisation des méthodes de comptabilisation. En général, l'approche « FC = -1/+1 » est à privilégier, avec des ajustements manuels ou par défaut dans les bases de données pour corriger le bilan de masse du carbone biogénique. Les aspects dynamiques doivent être considérés seulement s'ils sont pertinents pour l'étude, ajoutant une information distincte des résultats statiques. Enfin, l'ajustement des flux d'inventaire liés à l'usage et à la transformation des terres est essentiel pour une évaluation environnementale plus juste.

Ce rapport fournit une base de connaissances pour comprendre et améliorer la comptabilisation du carbone biogénique en ACV. Il souligne la nécessité d'harmoniser les méthodes de comptabilisation des GES biogéniques et l'importance de poursuivre la recherche pour mieux évaluer les impacts environnementaux des produits et des systèmes tout au long de leur cycle de vie.

Références

- Albers, A., Collet, P., Benoist, A., & Hélias, A. (2020). Back to the future: dynamic full carbon accounting applied to prospective bioenergy scenarios. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(7). <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01695-7>
- Barthel, M., Jennings, S., Schreiber, W., Sheane, R., Royston, S., Fry, J., Khor, Y. L., & McGill, J. (2018). Study on the environmental impact of palm oil consumption and on existing sustainability standards. In *Publications Office of the European Union*. <https://doi.org/10.2779/530244>
- Benoist, A., & Bessou, C. (2018). *Prise en compte en analyse de cycle de vie (ACV) du lien usage des sols – changement climatique : revue critique des méthodologies existantes*.
- Bessou, C., Benoist, A., Tailleur, A., Godard, C., Gac, A., & Boissy, J. (2018). *Projet SOCLE, soil organic carbon changes in LCA, which evaluations to improve environmental assessments? Rapport de synthèse*.
- Bessou, C., Chase, L. D. C., Henson, I. E., Abdul-Manan, A. F. N., Milà I Canals, L., Agus, F., Sharma, M., & Chin, M. (2014). Pilot application of PalmGHG, the Roundtable on Sustainable Palm Oil greenhouse gas calculator for oil palm products. *Journal of Cleaner Production*, 73, 136–145. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.008>
- Brandão, M., Kirschbaum, M. U. F., Cowie, A. L., & Hjuler, S. V. (2019). Quantifying the climate change effects of bioenergy systems: Comparison of 15 impact assessment methods. *GCB Bioenergy*, 11(5), 727–743. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12593>
- Brandão, M., Lefebvre, A., Kirschbaum, M. U. F., Weidema, B. P., Cowie, A. L., Jørgensen, S. V., Hauschild, M. Z., Pennington, D. W., & Chomkhamsri, K. (2013). Key issues and options in accounting for carbon sequestration and temporary storage in life cycle assessment and carbon footprinting. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(1), 230–240. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0451-6>
- Brander, M., & Bjørn, A. (2023). Principles for accurate GHG inventories and options for market-based accounting. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(10). <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02203-8>
- Breton, C., Blanchet, P., Amor, B., Beauregard, R., & Chang, W. S. (2018). Assessing the climate change impacts of biogenic carbon in buildings: A critical review of two main dynamic approaches. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/su10062020>
- Carcassi, O. B., Habert, G., Malighetti, L. E., & Pittau, F. (2022). Material Diets for Climate-Neutral Construction. *Environmental Science and Technology*, 56(8). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05895>
- Cardellini, G., Mutel, C. L., Vial, E., & Muys, B. (2018). Temporalis, a generic method and tool for dynamic Life Cycle Assessment. *Science of the Total Environment*, 645, 585–595. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.044>
- Cherubini, F., Bright, R. M., & Strømman, A. H. (2012). Site-specific global warming potentials of biogenic CO₂ for bioenergy: Contributions from carbon fluxes and albedo dynamics. *Environmental Research Letters*, 7(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045902>
- Cherubini, F., Peters, G. P., Berntsen, T., Strømman, A. H., & Hertwich, E. (2011a). CO₂ emissions from biomass combustion for bioenergy: Atmospheric decay and contribution to global warming. *GCB Bioenergy*, 3(5). <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01102.x>

- Cherubini, F., Peters, G. P., Berntsen, T., Strømman, A. H., & Hertwich, E. (2011b). CO2 emissions from biomass combustion for bioenergy: Atmospheric decay and contribution to global warming. *GCB Bioenergy*, 3(5), 413–426. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01102.x>
- Costa, M. H., Cunha, L., Cotrim da Cox, P. M., Eliseev, A. V., Henson, S., Ishii, M., Jaccard, S., Koven, C., Lohila, A., Patra, P. K., Piao, S., Rogelj, J., Syampungani, S., Zaehle, S., & Zickfeld, K. (2023). Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In J. G. Canadell & P. M. S. Monteiro (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 673–816). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.007>
- Doka, G. (2024). Fossil/Biogenic carbon in Bio mass balanced products. In *LCA list*.
- Donke, A. C. G., Novaes, R. M. L., Pazianotto, R. A. A., Moreno-Ruiz, E., Reinhard, J., Picoli, J. F., & Folegatti-Matsuura, M. I. da S. (2020). Integrating regionalized Brazilian land use change datasets into the ecoinvent database: new data, premises and uncertainties have large effects in the results. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(6). <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01763-3>
- ecoinvent. (n.d.). *ecoQuery, Database Search*. Retrieved March 27, 2024, from <https://ecoquery.ecoinvent.org/>
- Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*.
- Ellen Mc Arthur Foundation. (n.d.). *Enabling a circular economy for chemicals with the mass balance approach, a white paper from co.project mass balance*.
- EN 15804+A2. (2019). Sustainability of construction works, Environmental product declarations, Core rules for the product category of construction products. In *European Commission, European Committee for Standardization*.
- EN 18027. (2023). Bio-based products. Life cycle assessment. Additional requirements and guidelines for comparing the life cycles of bio-based products with their fossil-based equivalents. In *Deutsche Institut für Normung e.V. (DIN)*.
- Encyclopédie Larousse. (n.d.). *Pphotosynthèse*.
- European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability. (2010). *ILCD handbook- General guide for life cycle assessment- Detailed guidance*.
- Fairtrade International. (n.d.). *Les labels FAIRTRADE*. Retrieved March 26, 2024, from <https://info.fairtrade.net/fr/what/the-fairtrade-marks>
- Fearnside, P. M., Lashof, D. A., & Moura-Costa, P. (2000). Accounting for time in mitigating global warming through land-use change and forestry. In *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* (Vol. 5, Issue 3). <https://doi.org/10.1023/A:1009625122628>
- Forest Stewardship Council. (n.d.). *Quelle est la signification de chaque étiquette du FSC?* Retrieved March 26, 2024, from <https://ca.fsc.org/ca-fr/quest-ce-que-le-fsc/quelle-est-la-signification-de-chaque-etiquette-du-fsc>
- Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D. J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M., & Zhang, H. (2023a). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity. In *Forster, P. Storelvmo, T. Armour, K. Collins, W. Dufresne, J.-L. Frame, D. Lunt, D.J. Mauritsen, T. Palmer, M.D. Watanabe, M. Wild, M. Zhang, H.* (pp. 923–1054). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.009>

- Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D. J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M., & Zhang, H. (2023b). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity Supplementary Material. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 923–1054). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/>
- Gaillot, T., Beauchet, S., Lorne, D., & Krim, L. (2023). The impact of fossil jet fuel emissions at altitude on climate change: A life cycle assessment study of a long-haul flight at different time horizons. *Atmospheric Environment*, 311, 119983. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119983>
- GHG Protocol. (2011). Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard. In *World Resources Institute (WRI) and World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)*.
- Gmünder, S., Zollinger, M., Dettling, J., Spitzer, M., & Stevenson, M. (2020). *Biogenic Carbon Footprint Calculator for Harvested Wood Products*. 33. <https://www.worldwildlife.org/projects/biogenic-carbon-footprint-calculator-for-harvested-wood-products>
- Guest, G., Bright, R. M., Cherubini, F., & Strømman, A. H. (2013). Consistent quantification of climate impacts due to biogenic carbon storage across a range of bio-product systems. *Environmental Impact Assessment Review*, 43, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.05.002>
- Guest, G., Cherubini, F., & Strømman, A. H. (2013). Global Warming Potential of Carbon Dioxide Emissions from Biomass Stored in the Anthroposphere and Used for Bioenergy at End of Life. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 20–30. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00507.x>
- Haberl, H., Erb, K. H., Krausmann, F., Gaube, V., Bondeau, A., Plutzar, C., Gingrich, S., Lucht, W., Fischer-Kowalski, M., Designed, F.-K., & Performed, W. L. (2007). *Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems* (Vol. 104).
- Head, M., Bernier, P., Levasseur, A., Beauregard, R., & Margni, M. (2019). Forestry carbon budget models to improve biogenic carbon accounting in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 213, 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.122>
- Holtmark, B. (2015). Quantifying the global warming potential of CO2 emissions from wood fuels. *GCB Bioenergy*, 7(2). <https://doi.org/10.1111/gcbb.12110>
- Holzapfel, P., Bach, V., & Finkbeiner, M. (2023). Electricity accounting in life cycle assessment: the challenge of double counting. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(7). <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02158-w>
- Hoxha, E., Passer, A., Saade, M. R. M., Trigaux, D., Shuttleworth, A., Pittau, F., Allacker, K., & Habert, G. (2020). Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods. *Buildings and Cities*, 1(1). <https://doi.org/10.5334/bc.46>
- ILCD Handbook. (2010). General Guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. In *European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability*.
- IPCC. (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- ISO 14040. (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. In *ISO Standards*.
- ISO 14044. (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. In *ISO Standards*.
- ISO 14067. (2018). Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification. In *ISO Standards*.
- ISO 21930. (2017). Sustainability in buildings and civil engineering works — Core rules for environmental product declarations of construction products and services. In *ISO Standards*.

- Kärcher, B. (2018). Formation and radiative forcing of contrail cirrus. *Nature Communications*, 9(1), 1824. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04068-0>
- Kendall, A. (2012). Time-adjusted global warming potentials for LCA and carbon footprints. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(8), 1042–1049. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0436-5>
- Koellner, T., Baan, L., Beck, T., Brandão, M., Civit, B., Margni, M., Canals, L. M., Saad, R., Souza, D. M., & Müller-Wenk, R. (2013). UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(6). <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0579-z>
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S. J., Freeman, S., Forster, P. M., Fuglestvedt, J., Gettelman, A., De León, R. R., Lim, L. L., Lund, M. T., Millar, R. J., Owen, B., Penner, J. E., Pitari, G., Prather, M. J., ... Wilcox, L. J. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
- Levasseur, A., & Brandão, M. (2013). *Étude SCORELCA n°2013-02 - État de l'art sur le stockage/déstockage du carbone par la biomasse au sein des ACV.*
- Levasseur, A., & Brandao, M. (2014). *État de l'art sur le stockage/destockage du carbone par la biomasse au sein des ACV.*
- Levasseur, A., Brandão, M., Lesage, P., Margni, M., Pennington, D., Clift, R., & Samson, R. (2012). Valuing temporary carbon storage. *Nature Climate Change*, 2(1), 6–8. <https://doi.org/10.1038/nclimate1335>
- Levasseur, A., de Schryver, A., Hauschild, M., Kabe, Y., Sahnoune, A., Tanaka, K., & Cherubini, F. (2017). Greenhouse gas emissions and climate change impacts. In R. Frischknecht & O. Jolliet (Eds.), *Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators: Vol. Volume 1* (pp. 60–79). United Nations Environment.
- Levasseur, A., Lesage, P., & Margni, M. (2010). Dynamic LCA and its application to global warming impact assessment. *Time*, 44(8), 3169–3174. <https://doi.org/10.1021/es9030003>
- Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M., Brandão, M., & Samson, R. (2012). Assessing temporary carbon sequestration and storage projects through land use, land-use change and forestry: Comparison of dynamic life cycle assessment with ton-year approaches. *Climatic Change*, 115(3–4), 759–776. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0473-x>
- Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M., Deschênes, L., & Samson, R. (2010). Considering time in LCA: Dynamic LCA and its application to global warming impact assessments. *Environmental Science and Technology*, 44(8). <https://doi.org/10.1021/es9030003>
- Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M., & Samson, R. (2013). Biogenic Carbon and Temporary Storage Addressed with Dynamic Life Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1). <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00503.x>
- Liu, W., Yu, Z., Xie, X., Von Gadow, K., & Peng, C. (2018). A critical analysis of the carbon neutrality assumption in life cycle assessment of forest bioenergy systems. In *Environmental Reviews* (Vol. 26, Issue 1). <https://doi.org/10.1139/er-2017-0060>
- Milà I Canals, L., Bauer, C., Depestele, J., Dubreuil, A., Knuchel, R. F., Gaillard, G., Michelsen, O., Müller-Wenk, R., & Rydgren, B. (2007). Key elements in a framework for land use impact assessment within LCA. In *International Journal of Life Cycle Assessment* (Vol. 12, Issue 1). <https://doi.org/10.1065/lca2006.05.250>
- Monfreda, C., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2008). Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(1). <https://doi.org/10.1029/2007GB002947>

- Moura Costa, P., & Wilson, C. (2000). An equivalence factor between CO2 avoided emissions and sequestration - Description and application in forestry. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 5(1). <https://doi.org/10.1023/A:1009697625521>
- Müller-Wenk, R., & Brandão, M. (2010). Climatic impact of land use in LCA-carbon transfers between vegetation/soil and air. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(2). <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0144-y>
- Nemecek, T., Bengoa, X., Lansche, J., Roesch, A., Faist-Emmenegger, M., Rossi, V., & Humbert, S. (2019). *World Food LCA Database - Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products*, v3.5.
- Novaes, R. M. L., Pazianotto, R. A. A., Brandão, M., Alves, B. J. R., May, A., & Folegatti-Matsuura, M. I. S. (2017). Estimating 20-year land-use change and derived CO2 emissions associated with crops, pasture and forestry in Brazil and each of its 27 states. *Global Change Biology*, 23(9), 3716–3728. <https://doi.org/10.1111/gcb.13708>
- PAS 2050. (2011). Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. In *Publicly Available Specification (PAS)*.
- Patouillard, L., Maxime, D., Ménard, J.-F., & Louineau, E. (2022). *ANALYSE DU CYCLE DE VIE DE LA BIOMASSE ÉNERGIE: ÉTAT DE L'ART, ENJEUX MÉTHODOLOGIQUES ET RECOMMANDATIONS*. www.ciraig.org
- Patouillard, L., Maxime, D., Ménard, J.-F., Louineau, E., Bolay, A.-F., de Wachter, H., Greffe, T., & Saunier, F. (2022). *Etude SCORELCA n°2021-01 - Analyse du cycle de vie de la biomasse énergie : état de l'art, enjeux méthodologiques et recommandations*. www.ciraig.org
- PEF. (2018). Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) Guidance version 6.3. In *Commission Européenne*.
- Pellerin Sylvain, Bamière Laure, Launay Camille, Martin Raphaël, Schiavo Michele, Angers Denis, Augusto Laurent, Balesdent Jérôme, Basile-Doelsch Isabelle, Bellassen Valentin, Cardinael Rémi, Cécillon Lauric, Ceschia Eric, Chenu Claire, Constantin Julie, Darroussin Joël, Delacote Philippe, Delame Nathalie, Gastal François, ... Réchauchere Olivier. (2019). Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude. In *Stocker du carbone dans les sols français*. INRA. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-3149-2>
- Pittau, F., Krause, F., Lumia, G., & Habert, G. (2018). Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls. *Building and Environment*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.006>
- Reinhard, J., Moreno Ruiz, E., & Gmünder, S. (2017). *Consideration of land use change in ecoinvent version 3.3: Method, Implementation and Illustration*. White paper, ecoinvent Association (Issue 3).
- Renewable Energy Directive. (2018). Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). In *European Parliament and of the Council of the European Union*.
- Rosenbaum, R. K., Hauschild, M. Z., Boulay, A. M., Fantke, P., Laurent, A., Núñez, M., & Vieira, M. (2017). Life cycle impact assessment. In *Life Cycle Assessment: Theory and Practice* (pp. 167–270). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_10
- Smith, C. (2023). *Chapter 7 of the Working Group I Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report - data for Figure 7.6 (v20220721)*. NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis.
- Sphera. (2022). *Sphera @ GaBi GaBi Databases & Modelling Principles 2022 GaBi Databases & Modelling Principles 2022*.

- Tian, H., Lu, C., Chen, G., Tao, B., Pan, S., Del Grosso, S. J., Xu, X., Bruhwiler, L., Wofsy, S. C., Kort, E. A., & Prior, S. A. (2012). Contemporary and projected biogenic fluxes of methane and nitrous oxide in North American terrestrial ecosystems. In *Frontiers in Ecology and the Environment* (Vol. 10, Issue 10). <https://doi.org/10.1890/120057>
- UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. (2016). *Global Guidance for life cycle impact assessment indicators, Volume 1*. www.lifecycleinitiative.org
- UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. (2019). *Global Guidance for life cycle impact assessment indicators, Volume 2*. www.lifecycleinitiative.org
- US EPA. (2024, February 16). *Overview of greenhouse gases | US EPA*. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- Ventura, A. (2023). Conceptual issue of the dynamic GWP indicator and solution. In *International Journal of Life Cycle Assessment* (Vol. 28, Issue 7). <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02028-x>
- Weidema B P, Bauer C, Hischier R, Mutel C, Nemecek T, Reinhard J, Vadenbo C O, & Wernet G. (2013). *Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3*.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9). <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Wiloso, E. I., Heijungs, R., Huppes, G., & Fang, K. (2016). Effect of biogenic carbon inventory on the life cycle assessment of bioenergy: Challenges to the neutrality assumption. *Journal of Cleaner Production*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.096>

Annexe 1 - Exigences réglementaires et normatives et du positionnement des acteurs publics et privés pour a comptabilisation des GES biogéniques

ISO 14067 (2018)		
Définition du carbone biogénique		Carbone dérivé de la biomasse, avec définitions de la biomasse Carbone contenu dans la tourbe explicitement non biogénique
Approche de comptabilisation	Flux de carbone biogénique dans l'inventaire	Tous les GES biogéniques doivent être inventoriés et émissions et séquestrations doivent être séparées
	Méthode de caractérisation	FC = -1/+1
Suivi des flux de carbone	Frontières du système	Pour un produit dérivé de la biomasse, toutes les étapes incluant (mais non limitées à) la culture, la production et la récolte doivent être incluses
	Carbone biogénique résiduel dans le produit	À spécifier pour une ACV cradle-to-gate
	Règles d'allocation	Pour les co-produits, hiérarchie : éviter, relations physiques sous-jacentes, autres relations (économique par exemple) Pour les sous-produits entrants ou sortants : allocation "closed-loop" ou "open-loop", pas de spécification particulière pour les flux de C (voir Annexe D) Pas de traitement spécifique du carbone biogénique
	Traçabilité/mass-balance	X
Aspect temporel / dynamique	Stockage temporaire du CO2 biogénique	Pas de prise en compte du stockage par défaut Si plus de 10 ans séparent l'étape de production des étapes d'usage et de fin de vie, il est possible de calculer un effet dynamique (dont du stockage) avec la méthode de son choix clairement spécifiée et les résultats déclarés séparément
	Stockage permanent de carbone	X
	Dynamique	Si plus de 10 ans séparent l'étape de production des étapes d'usage et de fin de vie, il est possible de calculer un effet dynamique avec la méthode de son choix clairement spécifiée et les résultats déclarés séparément
Land Use Land Use Change	dLUC	Les dLUC doivent être caractérisés en utilisant une méthode reconnue internationalement (IPCC Tier 1 est cité) et le bilan net des contributions liées aux dLUC doit être documenté séparément. Les impacts sont amortis sur une durée qui doit au moins contenir le temps de rotation de la biomasse et doit être documentée et justifiée L'annexe E donne des détails pour définir l'état de référence de la terre Le changement de gestion des terres est défini comme du "Land use" et non du "Land use change", mais les points ci-dessus s'appliquent de la même façon
	iLUC	Les iLUC devraient être inclus une fois qu'une méthode est internationalement reconnue
	Land Use	Non considérés

ILCD Handbook (2010)		
Définition du carbone biogénique		Aussi appelé "biological" Pas de définition explicite
Approche de comptabilisation	Flux de carbone biogénique dans l'inventaire	Le CO ₂ biogénique séquestré et le CO ₂ et le CH ₄ biogéniques émis sont inventoriés et différenciés des GES fossiles
	Méthode de caractérisation	FC = -1/+1
Suivi des flux de carbone	Frontières du système	Non spécifique au carbone biogénique
	Carbone biogénique résiduel dans le produit	X
	Règles d'allocation	Pour les co-produits, hiérarchie : éviter, relations physiques sous-jacentes, autres relations (économique par exemple) Pour les sous-produits entrants ou sortants : cut-off, de nombreux cas spécifiques sont détaillés
	Traçabilité/mass-balance	X
Aspect temporel / dynamique	Stockage temporaire du CO ₂ biogénique	Règle générale : ne pas en tenir compte sauf si clairement spécifié dans les objectifs de l'étude. Si pris en compte, méthode de Lashof simplifiée (utilisation d'un facteur linéaire pour le crédit). Le facteur de caractérisation par kg et par année est adapté selon le gaz (CO ₂ , CH ₄ et N ₂ O, d'autres peuvent être développés) Durée maximale de stockage fixée de 100ans.
	Stockage permanent de carbone	Émissions après 100 ans inventoriées séparément
	Dynamique	X
Land Use Land Use Change	dLUC	Les dLUC doivent être inventoriés La méthode IPCC Tier 1 est conseillée avec des ajustements sur la façon d'amortir les impacts Des lignes directrices sont données pour définir un état de référence
	iLUC	Les iLUC ne doivent être inclus qu'en modélisation conséquentielle.
	Land Use	Peu clair. Comme seule la méthode de l'IPCC est mentionnée, ne semble pas être inclus.

PEF (2018)		
Définition du carbone biogénique		Carbone soit contenu dans le CO ₂ absorbé de l'atmosphère par photosynthèse, soit contenu dans le CO ₂ , CH ₄ et CO émis suite à l'oxydation/la dégradation de matière organique
Approche de comptabilisation	Flux de carbone biogénique dans l'inventaire	Tous les flux de carbone biogénique peuvent être modélisés en utilisant le "biogenic" (notation ILCD) * Possibilité de simplifier la modélisation en incluant uniquement les émissions de CH ₄ biogénique (pas les autres flux)
	Méthode de caractérisation	Par défaut, méthode FC = 0/0 Possibilité de faire Inventaire = 0/0 "méthode simplifiée" Possibilité d'utiliser d'autres facteurs de caractérisation si le PEFCR le spécifie
Suivi des flux de carbone	Frontières du système	X
	Carbone biogénique résiduel dans le produit	Obligatoire pour les produits intermédiaires (cradle-to-gate) En général optionnel, mais obligatoire dans les infos techniques additionnelles pour les produits intermédiaires "The biogenic carbon content at factory gate 1947 (physical content and allocated content) shall always be reported as 'additional technical information'"
	Règles d'allocation	Pour les co-produits, hiérarchie : éviter, relations physiques sous-jacentes, autres relations (économiques, massiques...) Pour les sous-produits/déchets entrants ou sortants : méthode spécifique "Circular Footprint Formula" (CFF) qui répartit les impacts entre les cycles de vie précédents et suivants en fonction des marchés.
	Traçabilité/mass-balance	X
Aspect temporel / dynamique	Stockage temporaire du CO ₂ biogénique	Exclu
	Stockage permanent de carbone	Si une émission a lieu après 100 ans, elle est considérée comme un stockage permanent (crédit, -1) et doit être modélisée spécifiquement (car n'apparaît pas avec les méthodes FC = 0/0 et Inventaire = 0/0) * La durée de stockage peut être répartie entre le stockage dans la forêt et la durée de vie du produit. Voir Annexe H pour davantage de détail.
	Dynamique	X
Land Use Land Use Change	dLUC	Inclus (lignes directrices PAS2050)
	iLUC	Non inclus (lignes directrices PAS 2050)
	Land Use	Non inclus (lignes directrices PAS 2050)

PAS 2050 (2011)		
Définition du carbone biogénique		Carbone contenu dans la biomasse Le CO ₂ de l'air converti en carbonates non issus de la biomasse est considéré comme du carbone biogénique pour les calculs
Approche de comptabilisation	Flux de carbone biogénique dans l'inventaire	Les flux de GES biogéniques sont inventoriés (séquestration et émissions) Peuvent être exclus pour les produits alimentaires (alimentation humaine ou animale). Cette exclusion ne s'applique pas : a) aux émissions et aux absorptions de carbone biogénique utilisé dans la production de denrées alimentaires et d'aliments pour animaux (par exemple lors de la combustion de la biomasse comme combustible), lorsque ce carbone biogénique n'est pas incorporé au produit b) aux émissions autres que le CO ₂ résultant de la dégradation des déchets de denrées alimentaires et d'aliments pour animaux et de la fermentation entérique (5.1.1.1) ; c) à tout composant biogénique dans un matériau qui fait partie du produit final, mais qui n'est pas destiné à être ingéré (par exemple, l'emballage). Pour ces produits, les facteurs de caractérisation des GES autres que le CO ₂ doivent être adaptés pour prendre en compte la séquestration en amont du CO ₂
	Méthode de caractérisation	FC = -1/+1 (pas explicitement écrit, mais sous-entendu par les références à la séquestration de carbone) Correction du facteur CH ₄ biogénique pour tenir compte de la séquestration de CO ₂ dans le cas où elle est exclue (produits alimentaires)
Suivi des flux de carbone	Frontières du système	Par défaut du berceau au tombeau, si le produit est un produit intermédiaire, possible de faire l'ACV du berceau à la porte Important d'inclure l'étape ou la séquestration a lieu pour être sûr de la prendre en compte Pour une ACV cradle-to-gate, il faut clairement énoncer que l'ACV ne couvre pas toutes les étapes du cycle de vie dans l'interprétation et la communication des résultats
	carbone biogénique résiduel dans le produit	X
	Règles d'allocation	Pour les co-produits, hiérarchie : éviter (subdivision), substitution, règles spécifiques au produit s'il y en a, allocation économique Pour les sous-produits/déchets entrants ou sortants : règles spécifiques détaillées dans l'Annexe D. Permet de répartir les émissions et séquestrations, incluant celles des GES biogéniques La quantité de carbone séquestrée devrait refléter la quantité de carbone contenue dans le produit
	Traçabilité/mass-balance	X
Aspect temporel / dynamique	Stockage temporaire du CO ₂ biogénique	N'est plus requis, mais si souhaité, l'annexe E donne des formules pour le calculer
	Stockage permanent de carbone	Les émissions doivent être considérées sur une période de 100 ans, celles ont lieu après cette période ne sont pas comptabilisées.
	Dynamique	X
Land Use Land Use Change	dLUC	Inclus. Utiliser en priorité des données spécifiques, sinon les valeurs par défaut données en Annexe C (dérivées de the Office of the Renewable Fuel Agency's technical guidance), sinon méthode IPCC Tier 1. Répartition uniforme sur 20 ans des impacts des dLUC
	iLUC	Non inclus (pas de méthode robuste disponible)
	Land Use	Les facteurs par défaut ne dépendent pas de données d'occupation, ne semble pas être inclus

GHG Protocol (2011)		
Définition du carbone biogénique		Définition par opposition au carbone fossile Absorbé par photosynthèse
Approche de comptabilisation	Flux de carbone biogénique dans l'inventaire	Toutes les émissions et absorptions sont incluses et à séparer des émissions fossiles
	Méthode de caractérisation	FC = -1/+1
Suivi des flux de carbone	Frontières du système	Inclure les étapes où du carbone biogénique peut être absorbé
	Carbone biogénique résiduel dans le produit	À déclarer
	Règles d'allocation	Allocation basée sur les flux physiques (expliqué en d'autres termes Box [9.2])
	Traçabilité/mass-balance	X
Aspect temporel / dynamique	Stockage temporaire du CO2 biogénique	Ne pas l'inclure Possibilité de le calculer et de le déclarer séparément
	Stockage permanent de carbone	Ne pas l'inclure Possibilité de le calculer et de le déclarer séparément Si un facteur est appliqué, il doit aussi être appliqué sur les co-produits alloués et sur les matériaux recyclés
	Dynamique	X
Land Use Land Use Change	dLUC	Inclus, à la fois les émissions/absorptions liées au changement d'affectation des terres et au changement de gestion des terres. Basé sur IPCC Tier 1 Détail des calculs dans l'Appendix B Hiérarchie des données (données d'inventaires et facteurs de caractérisation) à utiliser : données primaires, données spécifiques au secteur, données spécifiques au pays, données génériques de l'IPCC La répartition des impacts dépend de la période de rotation de la culture Une méthode est aussi donnée pour estimer les impacts sans donnée spécifique
	iLUC	Non inclus, mais si calculés et représentent une part importante des impacts, il est conseillé de les déclarer séparément
	Land Use	Peut être inclus si des données sont disponibles

Annexe 2 – Données et résultats de l'application des approches dynamiques au cas d'étude

Inventaires du cycle de vie des flux d'avant-plan contenant du carbone pour les scénarios Béton, Bois et Bambou

Flux contenant du carbone (fossile et biogénique) de l'avant-plan pour le scénario Béton

Élément	Quantité unitaire	Unités	Total par UF	Durée de vie	C fossile content (kg/unité)	C _{bio} content (kg/unité)	C fossile (kg/UF)	C _{bio} (kg/UF)
Construction								
<i>Structure aérienne</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	60				
Concrete, 30-32MPa {CA-QC} concrete production 30-32MPa Cut-off, U	2,51E-01	m3	3,64E+01	60	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Concrete, 25MPa {CA-QC} concrete production 25MPa Cut-off, U	2,63E-02	m3	3,81E+00	60	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Reinforcing steel {GLO} market for Cut-off, U	2,08E+01	kg	3,02E+03	60	4,00E-03	0,00E+00	1,21E+01	0,00E+00
<i>Fondations</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	60				
Concrete, 25MPa {CA-QC} concrete production 25MPa Cut-off, U	6,89E-02	m3	9,99E+00	60	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Reinforcing steel {GLO} market for Cut-off, U	1,55E+01	kg	2,25E+03	60	4,00E-03	0,00E+00	9,01E+00	0,00E+00
<i>Fenêtres</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	30				
Glazing, triple, U<0.5 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	5,33E-03	m2	7,73E-01	30	1,19E-01	0,00E+00	9,19E-02	0,00E+00
Window frame, poly vinyl chloride, U=1.6 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	1,51E-02	m2	2,19E+00	30	2,49E+01	0,00E+00	5,45E+01	0,00E+00
<i>Membrane imperméable</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	60				
Fleece, polyethylene {GLO} market for Cut-off, U	1,50E+00	kg	2,18E+02	60	8,57E-01	0,00E+00	1,86E+02	0,00E+00
<i>Finitions (intérieures et extérieures)</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	30				
Ceramic tile {GLO} market for Cut-off, U	1,80E+01	kg	2,61E+03	30	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Lime mortier {GLO} market for Cut-off, U	7,17E+01	kg	1,04E+04	30	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Remplacement								
<i>Fenêtres</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	30				
Glazing, triple, U<0.5 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	5,33E-03	m2	7,73E-01	30	1,19E-01	0,00E+00	9,19E-02	0,00E+00
Window frame, poly vinyl chloride, U=1.6 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	1,51E-02	m2	2,19E+00	30	2,49E+01	0,00E+00	5,45E+01	0,00E+00
<i>Finitions (intérieures et extérieures)</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	30				
Ceramic tile {GLO} market for Cut-off, U	1,80E+01	kg	2,61E+03	30	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Lime mortier {GLO} market for Cut-off, U	7,17E+01	kg	1,04E+04	30	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Flux contenant du carbone (fossile et biogénique) de l'avant-plan pour le scénario Bois

Élément	Qte unitaire	unités	Total par UF	Durée de vie	C fossile content (kg/unité)	Cbio content (kg/unité)	C fossile (kg/UF)	Cbio (kg/UF)
Construction								
<i>Structure aérienne</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	60				
Sawnwood, hardwood, raw, dried (u=20%) {RER} market for Cut-off, U	7,92E-02	m3	1,15E+01	60	0,00E+00	3,21E+02	0,00E+00	3,69E+03
Oriented strand board {RER} market for oriented strand board Cut-off, U	3,67E-02	m3	5,32E+00	60	0,00E+00	2,81E+02	0,00E+00	1,50E+03
<i>Fondations</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	60				
Concrete, 25MPa {CA-QC} concrete production 25MPa Cut-off, U	5,44E-02	m3	7,89E+00	60	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Reinforcing steel {GLO} market for Cut-off, U	1,23E+01	kg	1,78E+03	60	4,00E-03	0,00E+00	7,11E+00	0,00E+00
<i>Fenêtres</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	30				
Glazing, triple, U<0.5 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	5,67E-03	m2	8,22E-01	30	1,19E-01	0,00E+00	9,78E-02	0
Window frame, wood-metal, U=1.6 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	1,54E-02	m2	2,23E+00	30	4,20E+00	4,33E+01	9,38E+00	9,67E+01
<i>Membrane imperméable</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	60				
Fleece, polyethylene {GLO} market for Cut-off, U	1,50E+00	kg	2,18E+02	60	8,57E-01	0,00E+00	1,86E+02	0,00E+00
<i>Finitions (intérieures et extérieures)</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	30				
Sawnwood, hardwood, raw, dried (u=20%) {RER} market for Cut-off, U	1,86E-02	m3	2,70E+00	30	0,00E+00	1,05E+03	0,00E+00	2,84E+03
Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER} market for Cut-off, U	1,67E-02	m3	2,42E+00	30	0,00E+00	2,22E+02	0,00E+00	5,38E+02
Gypsum plasterboard {GLO} market for Cut-off, U	2,13E+01	kg	3,08E+03	30	1,10E-03	1,89E-02	3,39E+00	5,82E+01
Remplacement								
<i>Fenêtres</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	30				
Glazing, triple, U<0.5 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	5,33E-03	m2	7,73E-01	30	1,19E-01	0,00E+00	9,19E-02	0,00E+00
Window frame, poly vinyl chloride, U=1.6 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	1,51E-02	m2	2,19E+00	30	4,20E+00	4,33E+01	9,19E+00	9,48E+01
<i>Finitions (intérieures et extérieures)</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	30				
Sawnwood, hardwood, raw, dried (u=20%) {RER} market for Cut-off, U	1,86E-02	m3	2,70E+00	30	0,00E+00	3,21E+02	0,00E+00	8,66E+02
Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER} market for Cut-off, U	1,67E-02	m3	2,42E+00	30	0,00E+00	2,22E+02	0,00E+00	5,38E+02
Gypsum plasterboard {GLO} market for Cut-off, U	2,13E+01	kg	3,08E+03	30	1,10E-03	1,89E-02	3,39E+00	5,82E+01

Flux contenant du carbone (fossile et biogénique) de l'avant-plan pour le scénario Bambou

Élément	Qte unitaire	unités	Total par UF	Durée de vie	C fossil content (kg/unité)	Cbio content (kg/unité)	C fossil (kg/UF)	Cbio (kg/UF)
Construction								
<i>Structure aérienne</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	60				
Cross Laminated Bamboo	1,80E+02	kg	2,61E+04	60	0,00E+00	4,12E-01	0,00E+00	1,07E+04
<i>Fondations</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	60				
Concrete, 25MPa {CA-QC} concrete production 25MPa Cut-off, U	5,44E-02	m3	7,89E+00	60	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Reinforcing steel {GLO} market for Cut-off, U	1,23E+01	kg	1,78E+03	60	4,00E-03	0,00E+00	7,11E+00	0,00E+00
<i>Fenêtres</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	30				
Glazing, triple, U<0.5 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	5,67E-03	m2	8,22E-01	30	1,19E-01	0,00E+00	9,78E-02	0,00E+00
Window frame, wood, U=1.5 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	1,60E-02	m2	2,32E+00	30	2,41E+00	4,69E+01	5,59E+00	1,09E+02
<i>Membrane imperméable</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	60				
Fleece, polyethylene {GLO} market for Cut-off, U	1,50E+00	kg	2,18E+02	60	8,57E-01	0,00E+00	1,86E+02	0,00E+00
<i>Finitions (intérieures et extérieures)</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	30				
Cross Laminated Bamboo	9,75E+00	kg	1,41E+03	30	0,00E+00	4,12E-01	0,00E+00	5,82E+02
Clay plaster {GLO} market for Cut-off, U	3,60E+01	kg	5,22E+03	30	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cross Laminated Bamboo	1,47E+01	kg	2,13E+03	30	0,00E+00	4,12E-01	0,00E+00	8,77E+02
Remplacement								
<i>Fenêtres</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	30				
Glazing, triple, U<0.5 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	5,33E-03	m2	7,73E-01	30	1,19E-01	0,00E+00	9,19E-02	0,00E+00
Window frame, wood, U=1.5 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	1,60E-02	m2	2,19E+00	30	2,41E+00	4,69E+01	5,27E+00	1,03E+02
<i>Finitions (intérieures et extérieures)</i>	1,00E+00	m2	1,45E+02	30				
Cross Laminated Bamboo	9,75E+00	kg	1,41E+03	30	0,00E+00	4,12E-01	0,00E+00	5,82E+02
Clay plaster {GLO} market for Cut-off, U	3,60E+01	kg	5,22E+03	30	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cross Laminated Bamboo	1,47E+01	kg	2,13E+03	30	0,00E+00	4,12E-01	0,00E+00	8,77E+02

Application de la méthode tonne.année (version simplifiée de l'ILCD Handbook) aux flux d'avant-plan

Application de l'approche tonne.année pour le scénario Béton

Élément	Unités	Durée de vie	C fossil (kg/UF)	Cbio (kg/UF)	Bois		C fossil (kg CO2 eq)	Cbio (kg CO2 eq)
					C fossil (kg.année)	Cbio (kg.année)		
Construction								
<i>Structure aérienne</i>								
	m2	60						
Sawnwood, hardwood, raw, dried (u=20%) {RER} market for Cut-off, U	m3		0,00E+00	3,69E+03	0,00E+00	2,21E+05	0,00E+00	-8,11E+03
Oriented strand board {RER} market for oriented strand board Cut-off, U	m3		0,00E+00	1,50E+03	0,00E+00	8,98E+04	0,00E+00	-3,29E+03
<i>Fondations</i>								
	m2	60						
Concrete, 25MPa {CA-QC} concrete production 25MPa Cut-off, U	m3		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Reinforcing steel {GLO} market for Cut-off, U	kg		7,11E+00	0,00E+00	4,26E+02	0,00E+00	-1,56E+01	0,00E+00
<i>Fenêtres</i>								
	m2	30						
Glazing, triple, U<0.5 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	m2		9,78E-02	0	2,93E+00	0,00E+00	-1,08E-01	0,00E+00
Window frame, wood-metal, U=1.6 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	m2		9,38E+00	9,67E+01	2,81E+02	2,90E+03	-1,03E+01	-1,06E+02
<i>Membrane d'imperméabilisation</i>								
	m2	60						
Fleece, polyethylene {GLO} market for Cut-off, U	kg		1,86E+02	0,00E+00	1,12E+04	0,00E+00	-4,10E+02	0,00E+00
<i>Finitions</i>								
	m2	30						
Sawnwood, hardwood, raw, dried (u=20%) {RER} market for Cut-off, U	m3		0,00E+00	2,84E+03	0,00E+00	8,51E+04	0,00E+00	-3,12E+03
Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER} market for Cut-off, U	m3		0,00E+00	5,38E+02	0,00E+00	1,61E+04	0,00E+00	-5,92E+02
Gypsum plasterboard {GLO} market for Cut-off, U	kg		3,39E+00	5,82E+01	1,02E+02	1,75E+03	-3,73E+00	-6,41E+01
Remplacement								
<i>Fenêtres</i>								
	m2	30						
Glazing, triple, U<0.5 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	m2		9,19E-02	0,00E+00	2,76E+00	0,00E+00	-1,01E-01	0,00E+00
Window frame, wood-metal, U=1.6 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	m2		9,19E+00	9,48E+01	2,76E+02	2,84E+03	-1,01E+01	-1,04E+02
<i>Finitions</i>								
	m2	30						
Sawnwood, hardwood, raw, dried (u=20%) {RER} market for Cut-off, U	m3		0,00E+00	8,66E+02	0,00E+00	2,60E+04	0,00E+00	-9,53E+02
Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER} market for Cut-off, U	m3		0,00E+00	5,38E+02	0,00E+00	1,61E+04	0,00E+00	-5,92E+02
Gypsum plasterboard {GLO} market for Cut-off, U	kg		3,39E+00	5,82E+01	1,02E+02	1,75E+03	-3,73E+00	-6,41E+01
TOTAL (kg CO2 eq)							-4,54E+02	-1,70E+04

Application de l'approche tonne.année pour le scénario Bambou

Élément	Unités	Durée de vie	C fossil (kg/UF)	Cbio (kg/UF)	Bambou		C fossil (kg CO2 eq)	Cbio (kg CO2 eq)
					C fossil (kg.année)	Cbio (kg.année)		
Construction								
<i>Structure aérienne</i>	m2	60						
Cross Laminated Bamboo	kg		0,00E+00	1,07E+04	0,00E+00	6,45E+05	0,00E+00	-2,36E+04
<i>Fondations</i>	m2	60						
Concrete, 25MPa {CA-QC} concrete production 25MPa Cut-off, U	m3		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Reinforcing steel {GLO} market for Cut-off, U	kg		7,11E+00	0,00E+00	4,26E+02	0,00E+00	-1,56E+01	0,00E+00
<i>Fenêtres</i>	m2	30						
Glazing, triple, U<0.5 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	m2		9,78E-02	0,00E+00	5,87E+00	0,00E+00	-1,08E-01	0,00E+00
Window frame, wood, U=1.5 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	m2		5,59E+00	1,09E+02	3,35E+02	6,53E+03	-6,14E+00	-1,20E+02
<i>Membrane d'imperméabilisation</i>	m2	60						
Fleece, polyethylene {GLO} market for Cut-off, U	kg		1,86E+02	0,00E+00	1,12E+04	0,00E+00	-4,10E+02	0,00E+00
<i>Finitions</i>	m2	30						
Cross Laminated Bamboo	kg		0,00E+00	5,82E+02	0,00E+00	1,75E+04	0,00E+00	-6,40E+02
Clay plaster {GLO} market for Cut-off, U	kg		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cross Laminated Bamboo	kg		0,00E+00	8,77E+02	0,00E+00	2,63E+04	0,00E+00	-9,65E+02
Remplacement								
<i>Fenêtres</i>	m2	30						
Glazing, triple, U<0.5 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	m2		9,19E-02	0,00E+00	2,76E+00	0,00E+00	-1,01E-01	0,00E+00
Window frame, wood, U=1.5 W/m2K {GLO} market for Cut-off, U	m2		5,27E+00	1,03E+02	1,58E+02	3,08E+03	-5,80E+00	-1,13E+02
<i>Finitions</i>	m2	30						
Cross Laminated Bamboo	kg		0,00E+00	5,82E+02	0,00E+00	1,75E+04	0,00E+00	-6,40E+02
Clay plaster {GLO} market for Cut-off, U	kg		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cross Laminated Bamboo	kg		0,00E+00	8,77E+02	0,00E+00	2,63E+04	0,00E+00	-9,65E+02
TOTAL (kg CO2 eq)							-4,38E+02	-2,71E+04

Application de la méthode GWPbio simplifiée aux flux d'avant-plan

Émissions de CO₂ biogénique par étape du cycle de vie, principal contributeur et type de biomasse associée pour les scénarios Béton, Bois et Bambou.

Étape		Béton	Bois	Bambou
Construction	Quantité CO ₂ bio (kg)	732,8	4275,7	11874,6
	Principal contributeur (%)	clinker production	waste wood, untreated, municipal incineration	waste bamboo residues, open burning
	Nature de la biomasse	softwood	hardwood	bambou
Usage	Quantité CO ₂ bio (kg)	6839,5	6839,5	6839,5
	Principal contributeur (%)	heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW	heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW	heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW
	Nature de la biomasse	softwood	softwood	softwood
Production des éléments remplacés	Quantité CO ₂ bio (kg)	285,9	673,4	1482,8
	Principal contributeur (%)	clinker production	board, hardwood, raw, kiln drying to u=20%	waste bamboo residues, open burning
	Nature de la biomasse	softwood	hardwood	bambou
Fin de vie des éléments remplacés	Quantité CO ₂ bio (kg)	3,1	3147,5	3283,8
	Principal contributeur (%)	heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW	waste wood, untreated, municipal incineration	waste wood, untreated, municipal incineration
	Nature de la biomasse	softwood	hardwood	bambou
Fin de vie du bâtiment	Quantité CO ₂ bio (kg)	29,5	15106,6	27169,1
	Principal contributeur (%)	heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW	waste wood, untreated, municipal incineration	waste wood, untreated, municipal incineration
	Nature de la biomasse	softwood	hardwood	bambou

Application de la méthode Levasseur

Inventaire des principaux GES pour le scénario Bambou par étape de cycle de vie

Substance	Compartiment	Unités	Construction	Usage	Production des éléments remplacés	Fin de vie des éléments remplacés	Fin de vie du bâtiment
Carbon dioxide, biogenic	Air	kg	4,21E+03	6,36E+03	5,87E+02	3,15E+03	1,51E+04
Carbon dioxide, fossil	Air	kg	9,75E+03	4,73E+04	1,91E+03	1,46E+02	9,48E+02
Carbon dioxide, in air	Raw	kg	3,77E+04	3,45E+03	8,65E+03	1,16E+00	4,06E+00
Carbon dioxide, land transformation	Air	kg	5,06E+01	3,31E+01	2,30E+01	1,25E-01	3,95E-01
Carbon dioxide, non-fossil, resource correction	Raw	kg	-1,11E+04	2,07E+03	-3,06E+03	4,34E-01	1,36E+00
Carbon dioxide, to soil or biomass stock	Soil	kg	4,51E-01	6,90E-01	1,48E-01	2,61E-03	1,03E-02
Dinitrogen monoxide	Air	kg	3,29E-01	4,78E+00	8,23E-02	3,74E-02	1,76E-01
Methane	Air	kg	4,08E-04	2,17E-04	1,57E-05	1,03E-06	4,73E-06
Methane, biogenic	Air	kg	1,03E+00	5,89E+00	5,74E-01	3,54E+00	1,54E+01
Methane, fossil	Air	kg	2,57E+01	8,63E+01	5,34E+00	1,95E-01	1,01E+00
Methane, land transformation	Air	kg	1,40E-02	3,00E-03	6,87E-03	7,56E-05	2,09E-04
Sulfur hexafluoride	Air	kg	5,72E-04	3,65E-02	2,03E-04	3,32E-06	1,25E-05
CO2 to air (total)		kg	1,40E+04	5,37E+04	2,52E+03	3,29E+03	1,61E+04
CO2 uptake (total)		kg	2,66E+04	5,53E+03	5,60E+03	1,60E+00	5,42E+00
Methane (total)		kg	2,67E+01	9,22E+01	5,92E+00	3,73E+00	1,64E+01
N2O (total)		kg	3,29E-01	4,78E+00	8,23E-02	3,74E-02	1,76E-01