SCORE LCA

ETUDE N°2020-01

ENJEU TEMPOREL DE L'INDICATEUR CHANGEMENT CLIMATIQUE EN ACV : DEFINITION ET APPLICATION

RAPPORT FINAL

Octobre 2021

Responsables scientifiques

- Yves Gérand, Pauline Roignant
EVEA
8 rue des Thébaudières
44800 Saint Herblain

- Pierre Collet, Helen Bewi-Komesse
IFPEN
1 et 4 avenue de Bois Préau
92852 Rueil-Malmaison Cedex

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, Enjeu temporel de l'indicateur Changement Climatique en ACV : définition et application, 2021, 72, n°2020-01

- ✓ 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.

Comité de suivi pour SCORE LCA : Jean-Paul Cazalets, Benjamin Jaumard, Marion Pasquier – TOTALENERGIES ; Anne Prieur-Vernat, Camille Jeandeaux – ENGIE ; Daniel Dunet – VEOLIA ; Anne Grau, Denis Le Boulch – EDF ; Yves Babian – RENAULT ; Erwan Autret – ADEME ; Véronique Andries, Fanny Lebailly, Marie-Jeanne Robert – Alstom ; Fabrice Del Corso – Air Liquide ; Bénédicte Couffignal – RECORD ; Philippe Osset, Jade Garcia - SCORE LCA

Contenu

Table des matières

1 Objet du document 6
2 Introduction 7
3 Changement climatique : définition, contributeurs et caractérisation 9
3.1 Définition du changement climatique 9
3.2 Cycles du carbone 11
3.3 Métriques du changement climatique 13
4 Le Global Warming Potential (GWP) ou Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) 15
4.1 Définition du forçage radiatif 15
4.2 Calcul du forçage radiatif 15
4.3 Calcul du GWP 15
5 Le Global Temperature Potential (GTP) 16
5.1 Calcul de l'indicateur 16
5.2 Comparaison GTP et GWP 17
5.3 Liens entre indicateurs du changement climatique et scénarios RCP 18
5.4 Etat des lieux des recommandations normatives 19
6 Place du temps dans le calcul des indicateurs GWP et GTP 21
6.1 Choix de l'horizon temporel 21
6.2 Efficacités radiatives ai 22
6.3 Fonctions de dégradation Ci(t) 23
6.3.1 Fonction de dégradation du CO_2 23
6.3.2 Fonction de dégradation des autres GES 24
6.4 Sensibilité climatique cj et temps de réponse du système climatique dj 24
6.5 Temps de réponse du système climatique dj 24
6.6 Evolution des métriques au cours des rapports du GIEC 24
7 Facteurs de caractérisation dynamiques 25
7.1 Rappel sur le cadre méthodologique de l'ACV dynamique 25
7.2 Présentation 26
7.3 Utilisation 27
7.3.1 Inventaire dynamique 27
7.3.2 Caractérisation dynamique 27
7.3.3 Illustrations sectorielles 29
7.4 Application de l'approche dynamique à la prise en compte du carbone biogénique 30

7.5 Revue bibliographique des normes, référentiels et guides méthodologiques 33
7.6 Evaluation dynamique du changement climatique : bibliographie scientifique 35
8 Cas d'étude : description 39
8.1 Le périmètre et les hypothèses 39
8.2 Les données utilisées et hypothèses 40
8.2.1 Données génériques 40
8.3 Caractérisation des principaux gaz à effet de serre 41
8.3.1 Cas particulier du carbone biogénique 41
8.3.2 Caractérisation des flux de substances contribuant à l'indicateur GES 41
9 Analyses de sensibilité 42
9.1.1 Considération statique : comparaison selon les facteurs de caractérisation 42
9.1.2 Considération statique : comparaison entre GWP et GTP 49
9.1.3 Comparaison entre statique et dynamique 52
10 Conclusions 67
11 Recommandations 69
12 References 70

Glossaire

FC : Facteur(s) de Caractérisation
GHG : Greenhouse Gase, Gaz à Effet de Serre (GES) en Français
GWP : Global Warming Potential, Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) en Français
GTP : Global Temperature Potential
NTCF : Near-Clear Climate Forcers
RCP : Representative Concentration Pathway
SH : surface habitable

1 Objet du document

Le présent document constitue le rapport final de l'étude SCORE LCA 2020-01 « **Indicateur ACV « Gaz à effet de serre », définition et application : l'enjeu temporel ».**

L'objectif de ce document est de détailler les fondements scientifiques liés à cette thématique ainsi que d'en illustrer les pratiques actuelles dans différentes études.

Également, la mise en œuvre de ces différents sujets dans le cadre d'un cas d'étude permet d'illustrer concrètement les enjeux liés pour le praticien d'ACV.

Les principaux axes étudiés sont les suivants :

- La question de l'horizon temporel
- L'évolution des facteurs de caractérisation fournis par l'IPCC
- Les dimensions temporelles des indicateurs Global Warming Potential (GWP) et Global Temperature Potential (GTP),
- L'ACV dynamique centrée sur les enjeux de GES.

A noter qu'un accent fort est porté sur la problématique du carbone biogénique car les enjeux temporels qui y sont associés (capture et émissions retardées) sont particulièrement pertinents pour illustrer les enjeux de temporalité.

2 Introduction

Plusieurs études SCORE LCA ont déjà abordé des problématiques connexes aux sujets de la présente étude.

Les études SCORE LCA citées ci-dessous sont accessibles sur :

https://www.scorelca.org/scorelca/etudes-acv.php

Une étude menée par Annie Levasseur (CIRAIG) et Miguel Brandao (2.0) pour SCORE LCA (SCORE LCA 2013-02 ÉTAT DE L'ART SUR LE STOCKAGE/DESTOCKAGE DU CARBONE PAR LA BIOMASSE AU SEIN DES ACV) avait conclu, concernant les aspects liés à la présente étude, que :

- Il existe différents types d'impact sur le changement climatique et ceux-ci peuvent être représentés par différents indicateurs (GWP, GTP, GSP…) . Par contre, des travaux de recherche sont encore nécessaires afin d'identifier quels indicateurs sont les plus appropriés, quel type d'impacts ils expriment et comment ils doivent être utilisés.

Ce point est l'objet des chapitres 4, 5 et 6 du présent rapport.

- Considération des aspects temporels des flux de séquestration : Il est recommandé d'utiliser une équation spécifique à la biomasse considérée pour le calcul de la dynamique de séquestration de carbone par la biomasse si celle-ci est disponible, ou d'utiliser une approximation linéaire dans le cas contraire. Plusieurs publications ont démontré que le délai de séquestration du carbone par la biomasse en croissance avait un impact important sur les résultats, en particulier pour les espèces à longue période de rotation.

Cet aspect est illustré dans le présent rapport mais ne sera pas traité de façon spécifique dans le cadre du projet. En effet, il a déjà été illustré dans ce précédent travail pour SCORE LCA et relève plus d'un aspect dynamique lié à l'inventaire qu'à la caractérisation. L'équipe EVEA-IFPEN se propose de mettre en œuvre l'outil DYNCO2 (Levasseur, n.d.) dans le cadre du présent projet pour la prise en compte de ces recommandations.

- Considération des aspects temporels : il est recommandé de tenir compte des aspects temporels des flux positifs et négatifs de GES lorsque l'échelle de temps couverte par les flux de GES du système à l'étude est assez longue par rapport à l'horizon temporel choisi pour l'analyse. De la recherche est encore nécessaire afin de bien comprendre l'évolution des bilans de carbone forestiers et le rôle de la forêt dans la lutte contre le changement climatique.

Cet aspect est illustré dans le présent rapport mais ne sera pas traité de façon spécifique dans le cadre du projet. En effet, les enjeux de capture et émission retardée de CO_2 sont au cœur des problématiques temporelles liées à l'indicateur GES.

L'étude SCORE LCA 2015-01 (PRISE EN COMPTE DE LA DIMENSION TEMPS EN ACV : ETAT DE L'ART, RECOMMANDATIONS ET SOLUTIONS POUR UNE MEILLEURE MISE EN ŒUVRE) réalisée par RDC Environnement, avait quant à elle conclu, concernant les points liés à la présente étude, que :

- Conclusion 6 : La prise en compte de la dimension temps en ACV sous la forme de la réalisation d'une **ACV dynamique** est actuellement très limitée dans la pratique ACV.
- Conclusion 7 : Le pas de temps à considérer pour la segmentation temporelle de l'inventaire varie d'un indicateur de catégories d'impact à un autre.
- La mise en œuvre de la dimension temps en ACV présente ses principales limites dans le cas de la mise en œuvre d'une ACV dynamique. Pour rappel, l'ACV dynamique nécessite 2 éléments actuellement difficilement accessibles:
    - La segmentation temporelle d'un jeu de données d'inventaire
    - La différentiation temporelle d'une méthode de caractérisation

Avant d'en présenter les limites :

- Limite 5 : La réalisation d'une ACV dynamique n'est pas possible avec les logiciels ACV actuels.

Ce point reste d'actualité et nous envisageons de contourner cette limite en illustrant le projet par un cas d'étude simple qui ne requiert pas nécessairement d'avoir recours à un logiciel d'ACV. L'usage du calculateur DYNCO2 sera notamment envisagé.

L'étude 2013-04 Indicateurs d'impacts environnementaux ACV : ETAT DE L'ART, RETOUR D'EXPERIENCE ET RECOMMANDATIONS réalisée par Pré Consulting et RDC environnement rappelait l'importance du choix de la méthode dans la caractérisation des impacts, en s'en tenant aux méthodes recommandées par l'ILCD dans le domaine des GES (IPCC 2007).

Dans le cas de la présente étude, l'évolution vers IPCC 2013 sera étudiée.

Enfin, l'étude 2015-07 RECOMMANDATIONS PRATIQUES POUR L'ACV PROSPECTIVE / REFERENCES ET EXEMPLES DANS LE DOMAINE DE L'ENERGIE réalisée par ECOSTATIS et l'IFPEN fournissait :

- Un état des lieux des sources disponibles pour établir des scenarii prospectifs dans le domaine de l'énergie.

Ces sources seront utilisées dans le cas d'étude du présent projet pour évaluer les impacts liés à la dynamique du mix énergétique d'un bâtiment. Le cas échéant, des sources plus à jour seront utilisées (rapports annuels de l'AIE, Stratégie Nationale Bas Carbone [SNBC], ADEME…).

- Des recommandations sur les typologies d'ACV pour lesquelles une approche prospective est importante, et les questionnements associés :
    - ACV d'un produit ou d'une gamme de produits existant à un horizon temporel éloigné (i.e. plus de 15 ans après la date de l'étude),

C'est l'exemple du cas d'étude retenu : un bâtiment à durée de vie longue. C'est la raison pour laquelle un scenario énergétique prospectif sera utilisé dans le cas d'étude du présent projet.

    - ACV d'un produit extrapolé du laboratoire au déploiement commercial ;
    - ACV d'un secteur entier (par ex. transport, énergie) associé à des scénarios prospectifs.

Dans ce contexte, l'aspect temporel peut être abordé de deux façons :

- Par une « photographie » d'une situation dans le futur ou
- Par l'évolution sur une période de temps donnée.

C'est cette deuxième approche qui sera retenue pour illustrer l'aspect dynamique de l'inventaire de cycle de vie du mix énergétique utilisé par le bâtiment à l'étude. En revanche, les flux de carbone feront l'objet d'un inventaire dynamique (e.g. annuel) pour permettre d'évaluer l'impact d'une caractérisation dynamique (nécessairement basée sur un inventaire dynamique) sur les résultats de l'ACV.

3 Changement climatique : définition, contributeurs et caractérisation

3.1 Définition du changement climatique

Le changement climatique est le nom donné au phénomène d'augmentation de la température observé depuis la révolution industrielle (Myhre et al., 2013). Il est dû à un déséquilibre entre l'énergie apportée par les radiations solaires et l'énergie renvoyée par le système terrestre (il y a moins d'énergie renvoyée que d'énergie reçue). L'équilibre entre énergie solaire reçue et énergie renvoyée dépend de plusieurs facteurs (Figure 1). L'énergie reçue est directement fonction de l'activité solaire. L'énergie renvoyée est quant à elle affectée par plusieurs facteurs : la couverture terrestre (qui modifie l'albédo et donc l'énergie renvoyée vers l'atmosphère), mais aussi les activités humaines qui, en changeant les concentrations en gaz et en aérosols dans l'atmosphère, affectent les quantités d'énergie renvoyée, notamment par l'absorption par les gaz à effet de serre (GES) d'une partie du rayonnement renvoyé par la Terre, et aussi par la formation de nuages autour des particules d'aérosols.

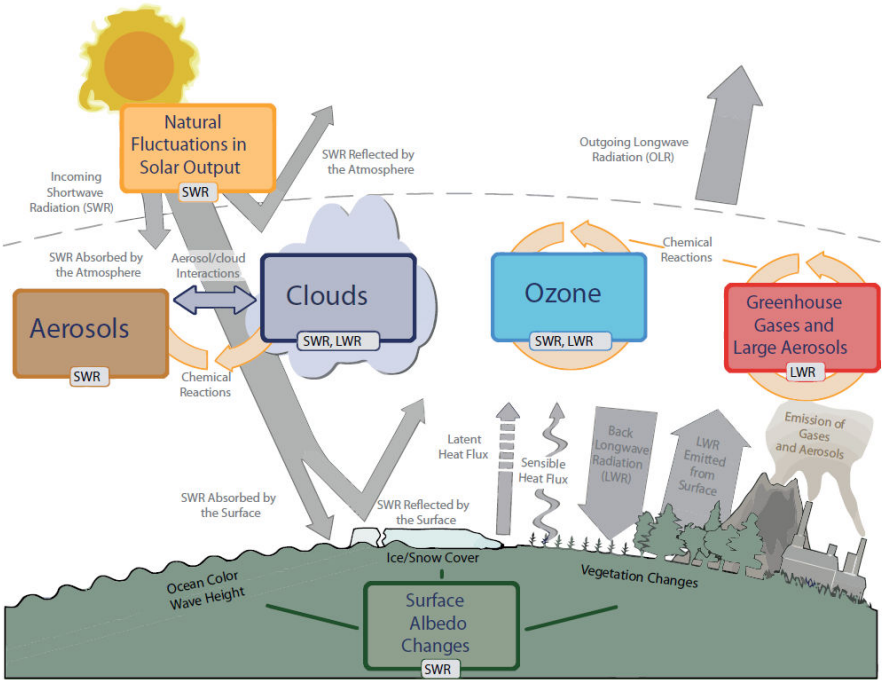


Figure 1 : Principaux facteurs du changement climatique, d'après Myhre et al., (2013)

La Figure 2 décrit les parts respectives des différents contributeurs au changement climatique entre 1750 et 2011. On constate que les activités humaines, notamment via les émissions de GES, sont les principales responsables du forçage radiatif, avec une augmentation de 2.29 $W.m^{-2}$ en 2011, contre seulement 1.25 $W.m^{-2}$ en 1980 et 1.6 $W.m^{-2}$ en 2005. C'est ce forçage radiatif positif qui provoque une hausse des températures et qui est à la base du réchauffement climatique. Les principaux GES émis par les activités humaines sont le dioxyde de carbone (CO_2), le protoxyde d'azote (N_2O), et le méthane (CH_4). En effet, ces GES représentaient à eux trois plus de 80% du forçage radiatif positif supplémentaire entre 1750 et 2011. Dans la suite de ce rapport, l'analyse des principaux paramètres nécessaires aux calculs des différents indicateurs climatiques sera donc restreinte à ces trois GES.

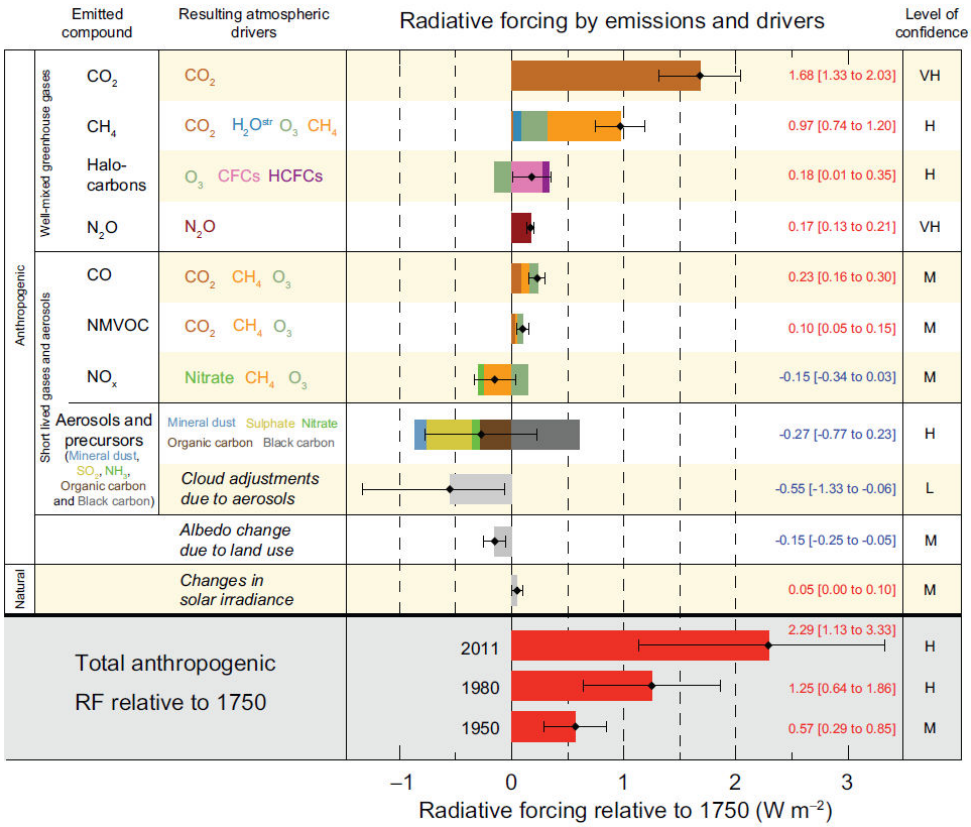


Figure 2 : Principaux contributeurs au forçage radiatif depuis 1750, d'après (Myhre et al., 2013)

Les projections en termes d'élévation de la température moyenne à la surface du globe à horizon 2100 sont présentées sur la Figure 3. Le scénario RCP 8.5 (Representative Concentration Pathway) correspond à un scénario sans politique climatique avec un forçage radiatif additionnel de 8.5 $W.m^{-2}$ en 2100. Le scénario RCP 2.6 représente quant à lui un système avec de très fortes contraintes sur les émissions de GES, limitant l'augmentation du forçage radiatif à 2.6 $W.m^{-2}$ en 2100. Les nombres indiqués sur les courbes correspondent au nombre de modèles climatiques utilisés pour calculer ces évolutions moyennes de température. Selon le RCP 8.5, le réchauffement pourrait atteindre 4°C à l'horizon 2100. Il correspond à une concentration en CO_2 dans l'atmosphère supérieure à 1300 ppm en 2100. Le scénario RCP 2.6 quant à lui permet de limiter l'augmentation de la température à 1°C. Il correspond à un pic de CO_2 à 490 ppm dans l'atmosphère avant 2100 puis à un déclin de la concentration de CO_2 atmosphérique.

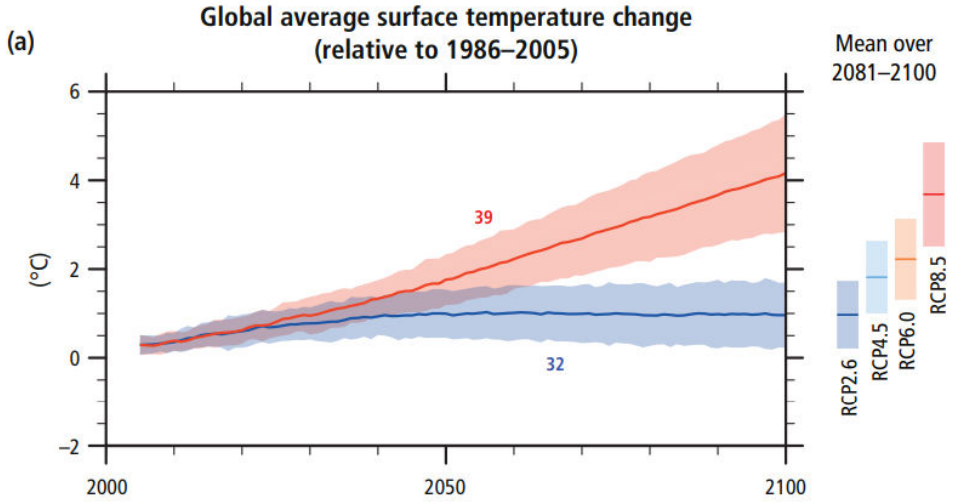


Figure 3 : Projections d'élévation de la température moyenne du globe selon les scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5, d'après (Myhre et al., 2013)

La vapeur d'eau est le plus large contributeur à l'effet de serre. Il est donc légitime de se demander pourquoi elle n'est pas comptabilisée comme GES et n'apparait donc pas dans la Figure 2. Ceci est dû au fait que la présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère est essentiellement reliée à la température à la surface du globe, et non pas à des émissions à proprement parler de vapeur d'eau par diverses sources. Par ailleurs, le temps moyen de résidence d'une molécule d'eau dans l'atmosphère est d'environ 10 jours (si on rajoute de l'eau dans l'atmosphère, celle-ci est très rapidement évacuée sous forme de précipitations). Par conséquent, la concentration atmosphérique en vapeur d'eau est principalement contrôlée par des processus naturels et très rapides, et très peu par les activités humaines. Pour résumer, la vapeur d'eau n'est pas le moteur du réchauffement climatique, mais elle y participe via un effet amplificateur. En effet, l'augmentation de la température induite par les émissions de GES induit une augmentation de la concentration en vapeur d'eau dans l'atmosphère, qui elle-même conduit à un renforcement de l'effet de serre.

Ce type de rétroaction (ou « feedback ») est aussi observé pour les gaz à effet de serre (CO_2, CH_4, N_2O etc.), mais sur des échelles de temps beaucoup plus longues. En effet, Le changement climatique influence le cycle global du carbone en influant sur les taux de respiration et de photosynthèse des sols. En climatologie, l'importance de ces rétroactions entre le climat et le cycle du carbone pour les futures projections climatiques a été mise en évidence par un travail de fond (cf 5.3). Cependant, la quantification des rétroactions du cycle du carbone et du climat est entachée de grandes incertitudes en raison des connaissances scientifiques limitées à l'heure actuelle (Frischknecht and Jolliet, 2016). Aussi, se pose la question de leur prise en compte dans les méthodes utilisées en ACV. Ce point sera discuté en 5.4.

3.2 Cycles du carbone

L'évolution de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère est imputable à la modification des activités humaines, principalement via deux mécanismes : l'utilisation de ressources fossiles pour la production d'énergie, qui libère du carbone stocké depuis plusieurs millions d'années, et le remplacement de forêts par des terres agricoles, modifiant de manière importante les échanges entre biosphère terrestre et atmosphère. Ces émissions font partie du cycle biogéochimique du carbone. Celui-ci régit les flux de carbone circulant entre les quatre principaux réservoirs de carbone :

- un réservoir à cycle de renouvellement « lent » (plus de 10 000 ans) : la lithosphère, qui renferme de très grandes quantités de carbone sous forme de carbonates ou d'hydrocarbures ;
- trois réservoirs à cycles de renouvellement « rapides » : l'atmosphère, les océans et la biosphère. Les océans contiennent près de 90 % du carbone, la biosphère 8 % et l'atmosphère 2 %. Dans la biosphère, 80% du carbone est contenu dans la litière et les sols, et 20% dans les parties aériennes.

La Figure 4 présente les teneurs en carbone des différents réservoirs ainsi que les quantités de carbone échangées entre les réservoirs (en noir les valeurs de 1750, et en rouge les valeurs de 2011). La majeure partie des échanges a lieu entre les réservoirs rapides, en particulier entre l'atmosphère et les océans, qui représentent à peu près 80 Gt de carbone par an (soit 290 Gt de CO_2), et entre l'atmosphère et la biosphère, qui représentent près de 120 Gt de carbone par an (soit 440 Gt de CO_2). Par comparaison, l'augmentation annuelle de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère imputable à la modification des activités humaines représente 40 Gt de CO_2eq / an (soit seulement 5,5 % des échanges « rapides ») : 36 GtCO_2eq/an dues à la combustion d'énergie fossile et 4 GtCO_2eq/an dues à la déforestation.

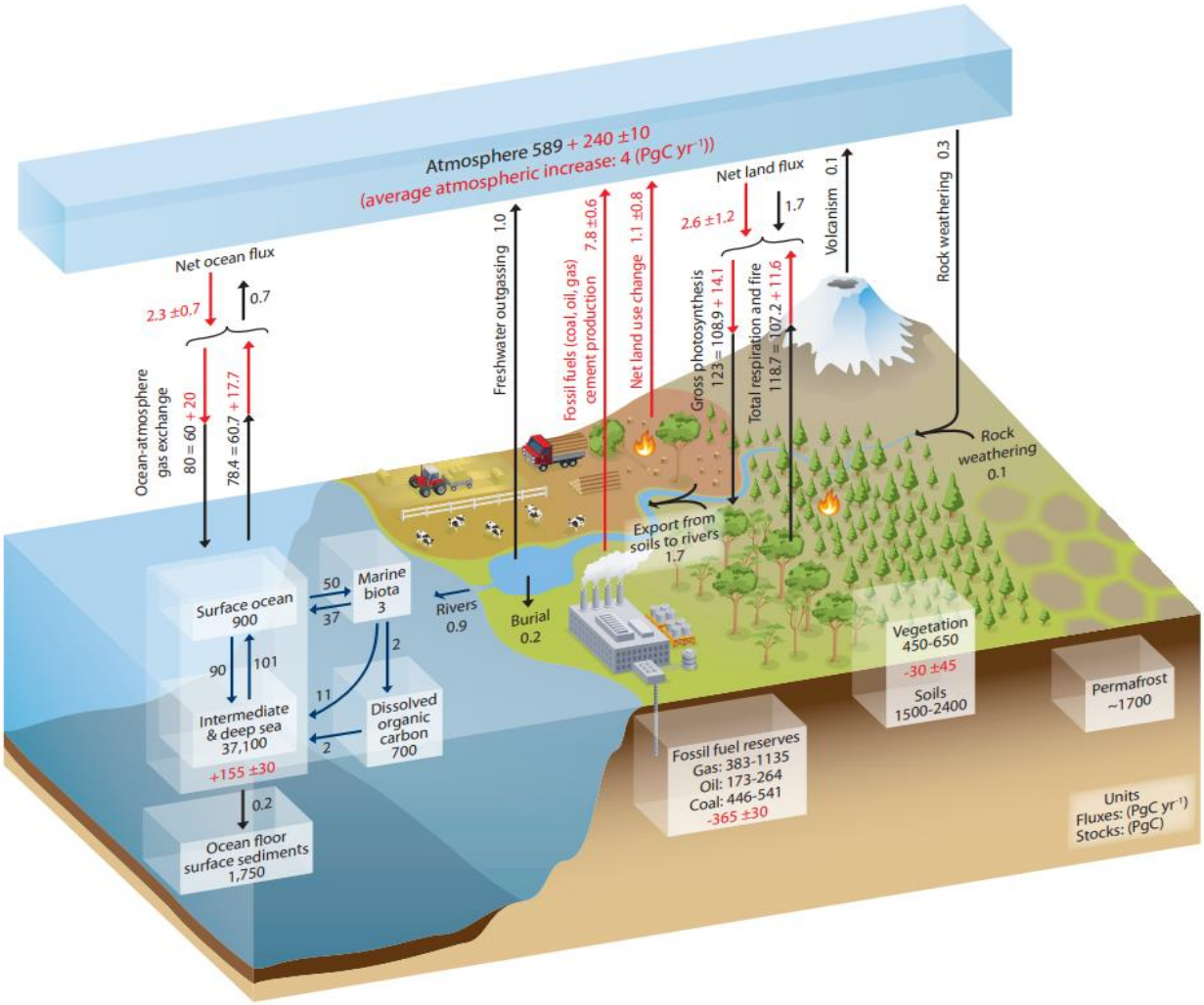


Figure 4 : Principaux réservoirs et flux du cycle du carbone impliqués dans le changement climatique, d'après (Myhre et al., 2013)

3.3 Métriques du changement climatique

Plusieurs métriques, correspondant à plusieurs indicateurs, sont disponibles pour évaluer le changement climatique (Figure 5). Ce paragraphe présente succinctement les différentes métriques disponibles dans la littérature. Un accent plus particulier est mis sur les métriques GWP (Global Warming Potential) et GTP (Global Temperature change Potential) utilisées en Analyse de Cycle de Vie (ACV) dans la section 4.

On distingue deux grandes catégories de métriques : d'une part les métriques instantanées (comme le GTP), et d'autre part les métriques dites cumulatives (comme le GWP). Les métriques instantanées évaluent l'indicateur considéré à un instant donné dans le futur après une émission, alors que les métriques cumulatives intègrent la valeur de l'indicateur considéré entre le moment de l'émission et un horizon temporel défini. Etant donné que les GES ont des durées de vie très différentes, le choix du caractère instantané ou cumulatif d'une métrique peut donner des poids relatifs très contrastés aux GES à courte durée de vie par rapport à ceux à longue durée de vie (voir la section 5.2 pour une comparaison entre le GWP et le GTP).

Différents indicateurs des conséquences du changement climatiques sont également indiqués dans la figure ci-dessous :

- Le forçage radiatif : cet indicateur correspond à une perturbation du bilan radiatif du système climatique de la Terre (voir section 4.1). C'est l'indicateur le plus utilisé dans l'évaluation du changement climatique, qui a été proposé dans le premier rapport du GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 1992).
- Le changement de température : cet indicateur correspond à une modification de la température suite à une émission de GES (voir section 5), et a été proposé au milieu des années 2000 (Shine et al. 2005).
- L'augmentation du niveau des océans : cet indicateur correspond à une modification du niveau de la mer suite à une émission de GES (Sterner et al. 2014). Les auteurs ont mis en évidence les conséquences importantes des GES (même à courte durée de vie) sur cet indicateur.
- Le changement du rythme des précipitations : cet indicateur correspond aux effets d'une émission de GES sur le cycle de l'eau (Shine et al. 2015). Les effets d'une augmentation des précipitations peuvent être positifs ou négatifs selon le lieu.

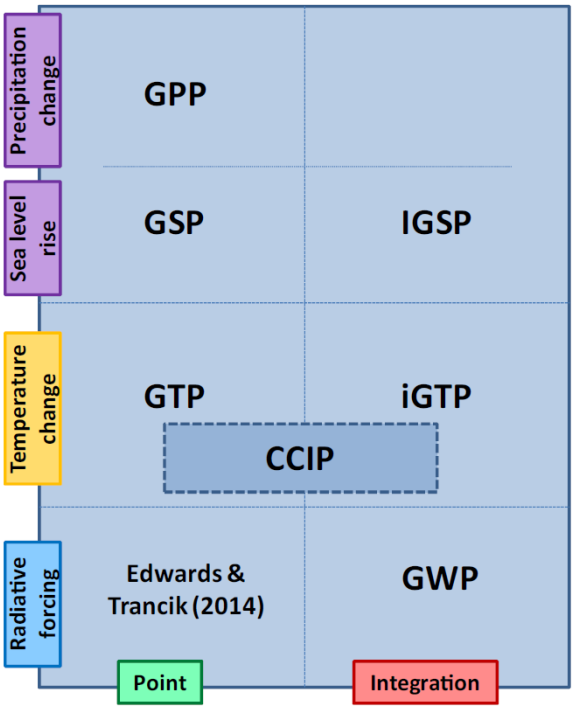


Figure 5 : Exemples de différentes métriques utilisées pour évaluer le changement climatique (Levasseur et al. 2016)

En ACV, la chaîne de causalité des impacts potentiels générés par une émission de GES est décrite dans la Figure 6. Une émission de GES entraîne une augmentation de sa concentration dans l'atmosphère, ce qui va générer une modification du forçage radiatif (indicateur GWP). Cette augmentation du forçage radiatif entraîne à son tour une modification de la température moyenne de la surface du globe (indicateur GTP), qui est à l'origine de nombreux dommages (impacts *midpoint*) : modifications des cycles hydrologiques (GPP), montée du niveau de la mer (GSP), augmentation de la température des cours d'eau… Ces dommages sont ensuite traduits en impacts sur les trois aires de protection (impacts en*dpoint*) : la qualité des écosystèmes, la santé humaine, les ressources naturelles et les services écosystémiques.

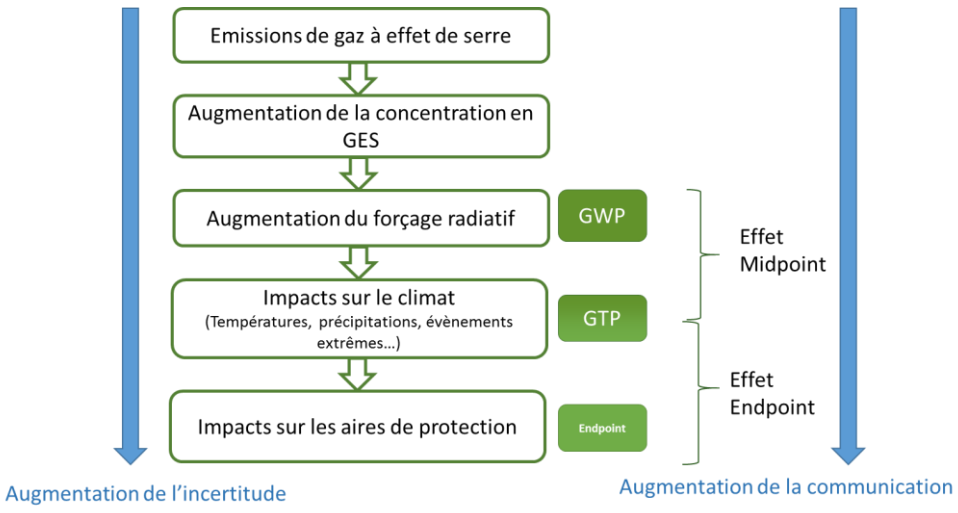


Figure 6 : Chaîne de causalité du changement climatique liée à l'émission de GES, d'après (Levasseur and Brandão, 2014)

4 Le Global Warming Potential (GWP) ou Pouvoir de Réchauffement Global (PRG)

4.1 Définition du forçage radiatif

Le bilan radiatif de la Terre est la différence entre le rayonnement reçu du Soleil et les rayonnements réfléchis ou réémis par la Terre et l'atmosphère terrestre vers l'espace. Ce bilan s'exprime en $W.m^{-2}$. Il est défini de la manière suivante dans le quatrième rapport du GIEC (Solomon et al., 2007) :

> « Le forçage radiatif mesure l'impact de certains facteurs affectant le climat sur l'équilibre énergétique du système couplé Terre/atmosphère. Le terme « radiatif » est utilisé du fait que ces facteurs modifient l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnements infrarouges sortant de l'atmosphère »

4.2 Calcul du forçage radiatif

Le forçage radiatif RF_i d'un GES *i* (en $W.m^{-2}$) est le produit de l'efficacité radiative a_i, qui correspond au forçage radiatif d'un GES par unité de masse de gaz émis, et la durée de vie du gaz en question dans l'atmosphère *Ci* (ou fonction de dégradation), qui s'exprime en fonction du temps (équation 1).

$$\boldsymbol{RF_i(t) = a_i \times C_i(t)} \qquad \textbf{Équation 1}$$

4.3 Calcul du GWP

Dans le premier rapport du GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 1992), le GWP était le seul indicateur du changement climatique disponible. De plus, c'est sur cet indicateur que se base le protocole de Kyoto. Ces deux éléments peuvent expliquer en partie pourquoi cet indicateur est aujourd'hui le plus utilisé quand il s'agit d'évaluer les conséquences du changement climatique, même si le concept de forçage radiatif est moins parlant que celui d'élévation de la température.

Le GWP d'un GES i mesure son forçage radiatif cumulatif (ou GWPi absolu, aGWPi) à un horizon temporel défini (Time horizon - TH) par rapport au forçage radiatif cumulatif du CO_2 sur le même horizon temporel (soit le rapport du GWP absolu du gaz i sur le GWP absolu du CO_2). Les aGWP des différents GES s'expriment $W.m^{-2}.yr.kg^{-1}$ de GES. L'aGWP du CO_2 s'exprime donc en $W.m^{-2}.yr.kg^{-1}$ de CO_2. Le GWP du GES i étant le ratio de l'aGWP du GES i et de l'aGWP du CO_2, il s'exprime donc en kg CO_2 eq / kg de GES i.

Le Tableau 1 présente les différentes valeurs du aGWP pour le CO_2, le CH_4 et le N_2O pour TH=20 et TH=100.

Tableau 1 : Valeurs des aGWP pour TH=20 et TH=100 pour le CO_2, le CH_4 et le N_2O

GES	aGWP20 ($W.m^{-2}.yr.kg^{-1}$)	aGWP100 ($W.m^{-2}.yr.kg^{-1}$)
CO_2	$2.49\ 10^{-14}$	$9.17\ 10^{-14}$
CH_4	$2.11\ 10^{-12}$	$2.73\ 10^{-12}$
N_2O	$6.58\ 10^{-12}$	$2.43\ 10^{-11}$

Les GWP peuvent donc être quantifiés pour différents horizons temporels, et présentent une forte dépendance au choix de cet horizon (voir section 6.1). Ils se calculent à l'aide de l'équation 2.

$$\boldsymbol{GWP_i = \frac{\int_0^{TH} RF_i(t)dt}{\int_0^{TH} RF_{CO_2}(t)dt} = \frac{\int_0^{TH} a_i \times C_i(t)dt}{\int_0^{TH} a_{CO_2} \times C_{CO_2}(t)dt} = \frac{aGWP_i}{aGWP_{CO_2}}} \qquad \textbf{Équation 2}$$

La Figure 7 résume les principaux paramètres nécessaires au calcul des GWP.

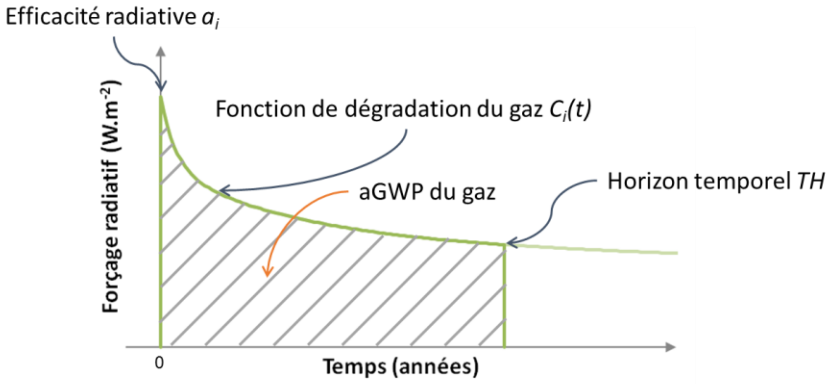


Figure 7 : Principaux paramètres nécessaires au calcul des GWP d'après (Cornillier et al., 2015)

5 Le Global Temperature Potential (GTP)

5.1 Calcul de l'indicateur

Le GTP représente l'évolution de la température à la suite d'une émission de GES, et peut lui aussi être calculé pour différents horizons temporels. Cet indicateur correspond à un ratio entre le changement de température ayant lieu x années suivant l'émission ponctuelle d'un GES et l'augmentation de température causée par une émission de la même quantité de CO_2 sur x années. Concrètement, le calcul des GTP fait intervenir les mêmes paramètres que le calcul des GWP (efficacité radiative et fonction de dégradation), et deux paramètres supplémentaires : la sensibilité climatique c (en K / (W.m^{-2})) et le temps de réponse d (en années). La sensibilité climatique caractérise la réponse de la température de l'atmosphère à un forçage radiatif donné. Le temps de réponse représente la durée due à l'inertie thermique de la Terre entre une émission de GES et la modification de la température de l'atmosphère.

Pour calculer le GTP absolu d'un GES i (aGTPi), un nouveau terme doit donc être introduit. Il s'agit de la réponse climatique R_T qui permet de convertir la variation du forçage radiatif en variation de la température, et qui repose sur la prise en compte des nouveaux paramètres sensibilité climatique (c) et temps de réponse (d) (Equation 3).

$$\boldsymbol{R_T(t) = \sum_{j=1}^{M} \frac{c_j}{d_j} \times e^{-t/d_j}} \qquad \textbf{Équation 3}$$

Le GTP absolu pour un horizon temporel TH défini est alors obtenu à l'aide de l'équation 4.

$$aGTP_i(TH) = \int_0^{TH} RF_i(t) \times R_T(TH - t)dt \qquad \textbf{Équation 4}$$

Les aGTP des différents GES s'expriment en K.kg^{-1} de GES. Ils traduisent donc directement une modification de la température projetée x années (correspondant à l'horizon temporel choisi) après une émission de GES. Le Tableau 2 présente différentes valeurs de l'aGTP pour le CO2, le CH4 et le N2O pour TH=20 et TH=100.

Tableau 2 : Valeurs des aGTP pour TH=20 et TH=100 pour le CO2, le CH4 et le N2O

GES	aGTP20 (K.kg^{-1})	aGTP100 (K.kg^{-1})
CO2	6.84 10^{-16}	5.47 10^{-16}
CH4	4.68 10^{-14}	3.11 10^{-15}
N2O	1.89 10^{-13}	1.28 10^{-13}

Le GTP du GES i étant le ratio de l'aGTP du GES i et de l'aGTP du CO2, il s'exprime comme le GWP en kg CO2 eq / kg de GES i, et se calcule à l'aide de l'équation 5.

$$GTP_i = \frac{aGTP_i}{aGTP_{CO_2}} \qquad \textbf{Équation 5}$$

5.2 Comparaison GTP et GWP

Comme mentionné précédemment, le GWP est un indicateur cumulatif (ou avec mémoire), ce qui veut dire que lors du calcul de l'indicateur, ce qui se passe entre la date de l'émission et la fin de l'horizon temporel choisi est pris en compte. Par exemple dans la Figure 8, le GWP du gaz A est égal au ratio de l'aire rouge sur le ratio de l'aire bleue (qui correspond au CO_2) pour un horizon temporel donné.

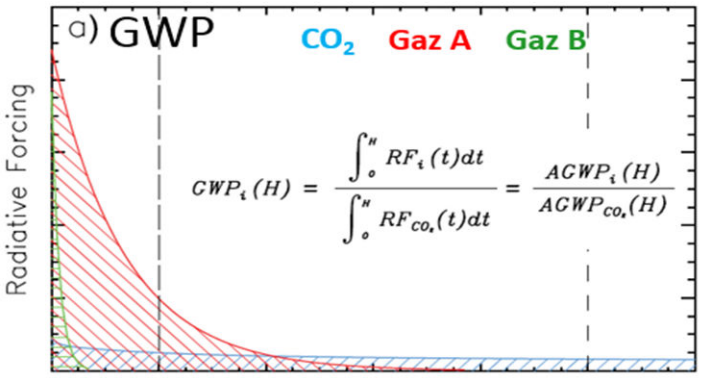


Figure 8 : Exemple de calcul du GWP, d'après (Myhre et al., 2013)

Ce caractère cumulatif permet de garder en mémoire les effets des GES avec fort impact et courte durée de vie. Par exemple pour le CH_4 qui a une durée de vie de 12 ans, la valeur du facteur de caractérisation pour le GWP est « uniquement » divisée par 3 entre un horizon temporel de 20 ans et un de 100 ans ($GWP_{CH4}(20)$ = 85 kg CO_2eq/kg CH_4 et $GWP_{CH4}(100)$ = 30 kg CO_2eq/kg CH_4).
En revanche, le GTP est un indicateur instantané (sans mémoire). Lors du calcul de l'indicateur, ce qui se passe avant l'horizon temporel choisi n'est pas gardé en mémoire. Par exemple dans la Figure 9, le GTP du gaz A est égal à la valeur de l'aGTP du gaz A à 20 ans (point rouge) divisé par la valeur de l'AGTP du CO_2 à 20 ans (point bleu).

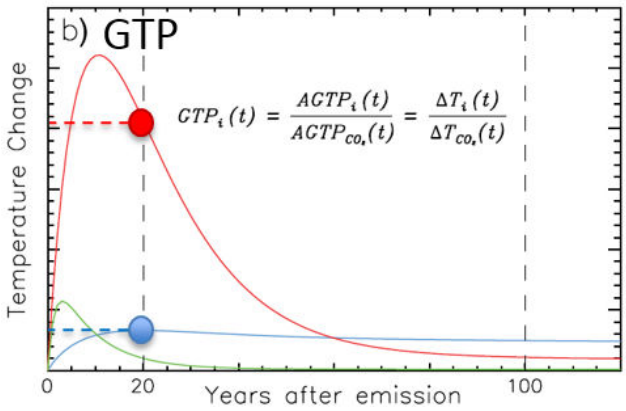


Figure 9 : Calcul du GTP, d'après (Myhre et al., 2013)

Ce caractère instantané induit aussi que les effets des GES avec fort impact et une courte durée de vie sont beaucoup moins conservés que dans le cas du GWP. Par exemple pour le CH_4, la valeur du facteur

de caractérisation pour le GTP est divisée par plus de 11 entre les deux horizons temporels ($GTP_{CH4}(20)$ = 68 kg CO_2eq/kg CH_4 et $GTP_{CH4}(100)$ = 6 kg CO_2eq/kg CH_4).

Le GTP est un indicateur qui est de plus en plus mis en avant. En effet dans le dernier rapport du GIEC, les GTP et les GWP sont présentés sur le même plan de robustesse (« *Emission metrics such as Global Warming Potential (GWP) and Global Temperature change Potential (GTP) can be used to quantify and communicate the relative and absolute contributions to climate change of emissions of different substances* »). Dans la communauté ACV, les récentes recommandations de l'UNEP (Frischknecht and Jolliet, 2016), préconisent les deux indicateurs (GWP et GTP). A titre de comparaison, seul le GWP était recommandé dans le 4ème rapport du GIEC («*GWPs remain the recommended metric to compare future climate impacts of emissions of long-lived climate gases*»). Il est important de préciser que le fait d'aller plus loin dans la chaîne de causalité (Figure 6) entraîne une augmentation de l'incertitude associée aux facteurs de caractérisation. Par conséquent les incertitudes associées aux GTP sont plus importantes que celles associées au GWP. Cette relative augmentation de l'incertitude est cependant à comparer aux incertitudes bien plus élevées (plusieurs ordres de grandeur) autour des facteurs de caractérisation de certaines catégories d'impacts (toxicité et écotoxicité notamment[1]).

5.3 Liens entre indicateurs du changement climatique et scénarios RCP

Les scénarios RCP correspondent à différentes valeurs d'augmentation du forçage radiatif en 2100 par rapport à la période préindustrielle, respectivement 2.6 $W.m^{-2}$ (RCP 2.6), 4.5 $W.m^{-2}$ (RCP 4.5), 6 $W.m^{-2}$ (RCP 6) et 8.5 $W.m^{-2}$ (RCP 8.5). Ces scénarios calculent le forçage radiatif généré par les émissions de GES projetées à chaque pas de temps. Ce calcul est réalisé en amont par rapport au calcul des aGWP et aGTP, et donc a fortiori encore plus en amont du calcul des GWP et des GTP. La Figure 10 présente les concentrations en différents GES (CO_2, CH_4, NOx et CFC) pour les différents scénarios RCP.

[1] Fantke, P. (Ed.), Bijster, M., Guignard, C., Hauschild, M., Huijbregts, M., Jolliet, O., Kounina, A., Magaud, V., Margni, M., McKone, T.E., Posthuma, L., Rosenbaum, R.K., van de Meent, D., van Zelm, R., 2017. USEtox® 2.0 Documentation (Version 1), http://usetox.org

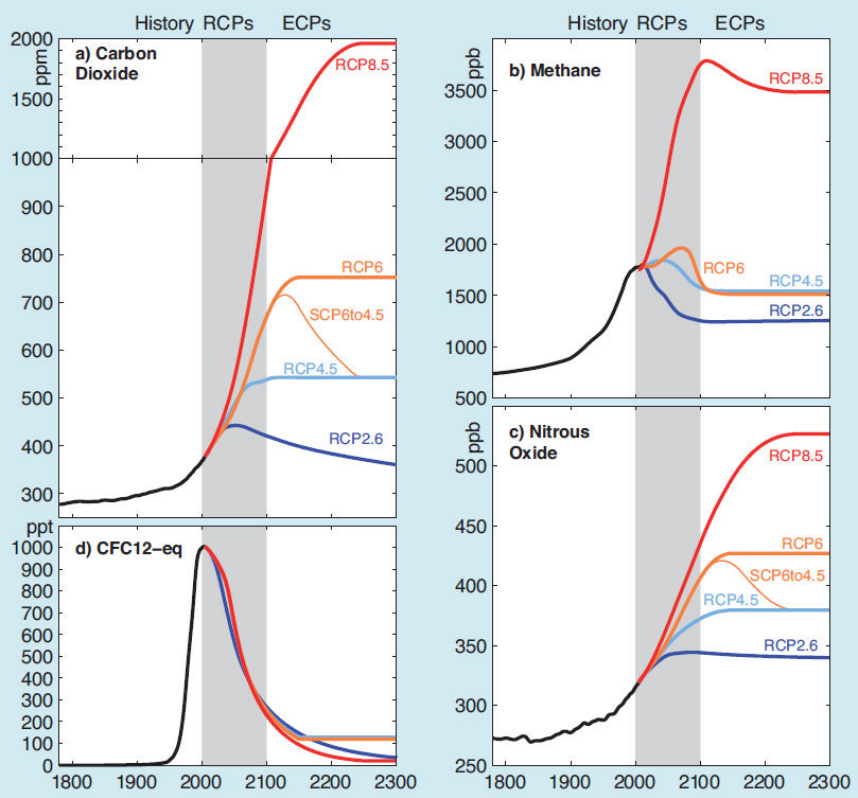


Figure 10 : Concentration en GES selon les 4 scénarios RCP (et leur projection après 2100 – Extended Concentration Pathways (ECP)), d'après (Myhre et al., 2013)

5.4 Etat des lieux des recommandations normatives

Tout d'abord, il est à noter que de nombreux référentiels font référence aux Facteurs de Caractérisation issus de l'IPCC 2013 (AR5, (Myhre et al., 2013)) sans préciser si les FC avec feedback (ou rétroaction) ou sans feedback doivent être considérés[2]. Ce point nécessiterait une clarification. Ainsi, les valeurs recommandées par l'UNEP/SETAC (Frischknecht and Jolliet, 2016) incluent les rétroactions climat-carbone pour tous les GES (Voir le tableau 8.SM.15, et non le 8.A.1 de l'annexe dans (Myhre et al., 2013)) et non pas pour le CO_2 seul, comme c'est actuellement le cas dans la méthode IPCC 2013 (tableau 8.A.1 de (Myhre et al., 2013)). Par conséquent, dans les facteurs présentés dans le tableau ci-dessous, seule la valeur du dénominateur (i.e le terme $aGWP_{CO2}$, commun à tous les calculs de GWP) change.

Tableau 3 : Facteurs de caractérisation d'une sélection de GES avec et sans prise en compte des feedbacks.

GES	**FC GWP 100 SANS feedback**	**FC GWP 100 AVEC feedback.**
CO2	1	1

[2] Le changement climatique influence le cycle global du carbone en influant sur les taux de respiration et de photosynthèse des sols. En climatologie, l'importance de ces rétroactions entre le climat et le cycle du carbone pour les futures projections climatiques a été mise en évidence par un travail de fond. Cependant, la quantification des rétroactions du cycle du carbone et du climat est entachée de grandes incertitudes en raison des connaissances scientifiques limitées à l'heure actuelle (Frischknecht and Jolliet, 2016).

CH4 (biogénique)[3]	28	34
CH4 (fossile)	30	36
N2O	265	298

Tableau 4 : Etat des lieux des recommandations des référentiels, normes et guides quant au choix de l'indicateur GES (GWP ou GTP), à la méthode de calcul et à l'horizon temporel choisi.

Référentiel	**Année de publication**	**Application**	**Horizon temporel (GWP ou GTP)**	**Facteurs de caractérisation**	**Indicateur GTP?**
Product Environmental Footprint 2013/179/EU	2013	Lignes directrices ACV	100 ans	IPCC 2007	Non
PEFCR Guidance : version 6.3 - May 2018	2018	Lignes directrices ACV	100 ans	-IPCC 2013 + -climate change carbon feedbacks (CO2 et non-CO2), cf reco UNEP / SETAC 2016 +	Non
ILCD Handbook	2011	Lignes directrices ACV	100 ans recommandé par alignement sur Kyoto (mais 50 ans préféré). 20, 100, 500 ans au choix dans LCIA Handbook (et reco de sensibilité).	IPCC 2007 (+ mis à jour lorsque de nouvelles versions seront disponibles)	Non
UNEP/SETAC, Global Guidance on environmental life cycle impact assessment indicators volume 1	2016	Lignes directrices AICV	100 ans (pour GWP et GTP)	IPCC AR5 INCLUANT les feedbacks* pour tous les gaz (CO2 et autres). Pour les effets climatiques à court terme, une analyse de sensibilité devrait également inclure les résultats des NTCF** et l'application du GWP20 (en plus du GWP100) comme CF.	Oui : GWP ET GTP
EN 15804:2012+A2:2019	2019	Référentiel sectoriel (bâtiment)	100 ans	GWP (source : IPCC 2013), somme des fossiles, biogénique et luluc à détailler	Non
ISO 14067:2018	2018	Empreinte carbone produit	100 ans (pour GWP et GTP)	IPCC 2013 (IPCC AR5)	Oui : GTP ou GWP
PAS 2050 : 2008 + 2011	2011	Empreinte carbone produit	GWP 100ans	IPCC 2007, charge au praticien de mettre à jour.	Non
Climate declaration (EPD® SYSTEM	2019	Empreinte (carbone) produit	GWP 100 ans	GWP (source : IPCC 2013), somme des	Non

[3] Les valeurs pour le méthane biogénique n'incluent pas les contributions de l'oxydation du méthane en CO_2, contrairement à celles pour le méthane fossile.

VERSION 3.01 2019-09-18)				fossiles, biogénique et luluc à détailler	
GHG Protocol	2011	Empreinte carbone produit	100 ans par défaut, possiblité d'indiquer les score 20 ans et 500 ans si jugé nécessaire.	IPCC (2007)	Proposé, si jugé nécessaire par le commanditaire.

6 Place du temps dans le calcul des indicateurs GWP et GTP

6.1 Choix de l'horizon temporel

L'horizon temporel décrit la période pendant laquelle les effets d'une émission de GES sont intégrés pour les métriques cumulatives (GWP) ou bien le nombre d'années suivant l'émission où l'impact est calculé pour les métriques instantanées (GTP). En ACV, un horizon temporel fixe est usuellement choisi (100 ans par exemple), ce qui veut dire que les impacts sont évalués sur la même période de temps quel que soit le moment où les émissions ont lieu pendant le cycle de vie. Les impacts sont donc évalués sur une « fenêtre de temps glissante » (Figure 11). Dans cet exemple l'émission d'une masse équivalente à 2 ppm de CO_2 atmosphérique est émise pour moitié à t_0, et pour moitié à t=50, avec des GWP ayant un horizon temporel de 100 ans. On constate que pour une émission ayant lieu à t0, le forçage radiatif de l'an t_0 à l'an 100 est considéré. En revanche, pour l'émission qui a lieu à t= 50 ans, le forçage radiatif est comptabilisé de l'an 50 à l'an 150.

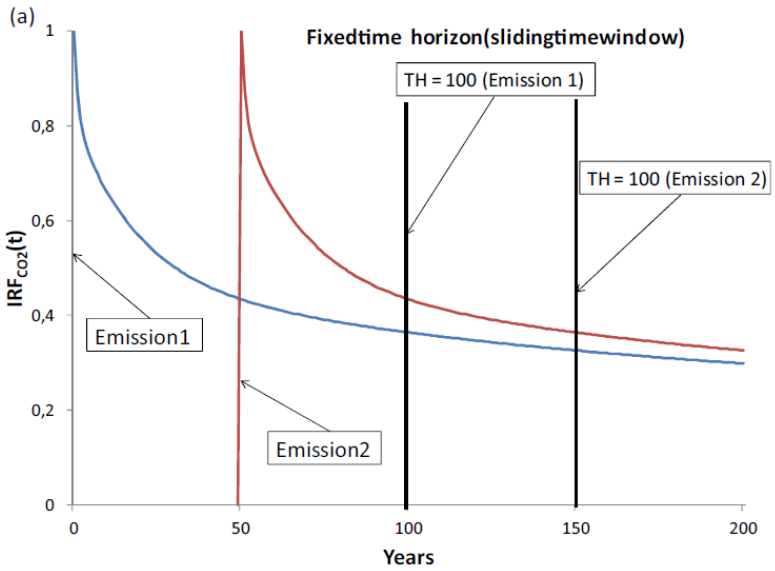


Figure 11 : Horizons temporels fixes et fenêtres d'analyse glissantes, d'après (Levasseur et al. 2016)

Les horizons temporels proposés dans les 4 premiers rapports du GIEC sont 20, 100 et 500 ans. Il est précisé dans le rapport que ces trois valeurs « are presented as candidates for discussion and should not be considered as having any special significance ». L'horizon temporel de 100 ans est aujourd'hui le plus largement utilisé. Cependant, il s'agit probablement là d'un « consensus par inadvertance » (Shine 2009), la valeur de 100 ans étant la médiane entre les horizons temporels utilisés par le GIEC dans ses quatre premiers rapports. Dans le dernier rapport du GIEC, l'horizon temporel de 500 ans a

été supprimé, du fait des incertitudes élevées à long terme pour les valeurs des efficacités radiatives et les rôles des puits de carbone.
L'utilisation du seul indicateur GWP100 est de plus en plus décriée. En effet cette métrique tend à diluer dans le temps les effets des GES à courte durée de vie, et donc impliquer de manière trompeuse que les polluants climatiques de courte durée exercent des forçages à long terme, longtemps après leur élimination. Par rapport au GTP, les valeurs des GWP ont donc tendance à garder en mémoire les effets passés, et donc à donner un poids relatif plus important aux GES à courte durée de vie. Dans le Tableau 5, on constate que pour un GES à courte durée de vie (CH_4), le GWP est uniquement divisé 3 par entre TH=20 et TH=100. Le GTP, par contre, est divisé par 11 entre ces deux horizons temporels.

Tableau 5 : Variations des valeurs des GWP et des GTP en fonction de l'horizon temporel pour le CH_4 et le N_2O (ref AR5)

GES	Durée de vie	GWP20	GWP100	GTP20	GTP100
CH_4	12.4	85	30	68	6
N_2O	121	264	265	277	234

La seule utilisation du GWP20 quant à elle ne prend en compte que les effets sur le climat dans les 20 années qui suivent l'émission du GES, négligeant potentiellement des effets climatiques pour les GES ayant une durée de vie supérieure à 20 ans. De la même manière, l'utilisation d'un seul horizon temporel pour le GTP peut poser ces problèmes. De récents travaux (Ocko et al. 2017) soulignent à ce titre l'importance d'inclure plusieurs horizons temporels lors de l'utilisation des indicateurs climatiques, et promeuvent l'utilisation systématique à la fois de l'horizon 20 ans et 100 ans pour éviter des conclusions basées sur des analyses tronquées. Le parallèle est fait dans cette publication avec la mesure de la pression artérielle (systolique et diastolique) ou bien avec les indications des consommations des véhicules en ville et sur l'autoroute, les deux variables étant à chaque fois nécessaires pour prendre une décision. Dans cette publication, les auteurs comparent les émissions de GES d'une motorisation diesel vs une motorisation GNC (gaz naturel comprimé). Avec le GWP100, le GNC est moins impactant que le diesel (80 gCO_2eq / MJ de CNG vs 89 gCO_2eq / MJ de diesel). Cependant, l'utilisation du GWP20 inverse l'ordre entre diesel et CNG, le diesel étant alors moins impactant (115 gCO_2eq / MJ de CNG vs 95 gCO_2eq / MJ de diesel).

Dans le domaine de l'ACV, le récent rapport de l'UNEP sur les recommandations à suivre pour l'évaluation des impacts (Frischknecht and Jolliet, 2016) **préconise d'évaluer les impacts du changement climatique dans deux catégories séparées** : l'impact à court terme, traduisant le rythme de modification de la température moyenne à la surface du globe, et l'impact à long terme, représentant les perspectives d'augmentation de la température à long terme. Pour l'impact à court terme, la métrique à privilégier est le **GWP100**. En effet cet indicateur est aujourd'hui le plus utilisé par la communauté ACV, mais aussi par les décideurs publics ou les entreprises. Il est également recommandé de faire des analyses de sensibilité en incluant le **GWP20 et les NTCFs** (Near Term Climate Forcers) afin de prendre en compte le potentiel de contribution potentiellement important de ces GES à très courte durée de vie. Pour l'impact à long terme, la métrique à privilégier est le **GTP100,** qui traduit l'augmentation potentielle de la température moyenne dans 100 ans.

6.2 Efficacités radiatives ai

L'efficacité radiative ai d'un GES i s'exprime en $W.m^{-2}.kg^{-1}$ (ou en $W.m^{-2}.ppb^{-1}$), et correspond au forçage radiatif par kg de gaz émis. Ce paramètre dépend des propriétés intrinsèques du GES i et de sa

concentration dans l'atmosphère, voire de la concentration dans l'atmosphère d'autres substances. La valeur de ce paramètre étant fonction de la concentration en GES i dans l'atmosphère, elle varie au cours du temps. Le

Tableau 6 présente l'évolution de l'efficacité radiative pour le CO_2, le CH_4 et le N_2O dans les trois derniers rapports du GIEC. On constate que pour ces trois GES, les valeurs des efficacités radiatives tendent à décroître au cours du temps.

Tableau 6 : Evolution des efficacités radiatives (ai) pour les trois principaux GES entre les 3ème, 4ème et 5ème rapports du GIEC

		Efficacité radiative ($W.m^{-2}.ppb^{-1}$)		
Rapport du GIEC		TAR	AR4	AR5
GES	CO_2	$1.55\ 10^{-5}$	$1.40\ 10^{-5}$	$1.37\ 10^{-5}$
	CH_4 fossile	$3.70\ 10^{-4}$	$3.70\ 10^{-4}$	$3.36\ 10^{-4}$
	N_2O	$3.10\ 10^{-3}$	$3.03\ 10^{-3}$	$3.00\ 10^{-3}$

6.3 Fonctions de dégradation Ci(t)

6.3.1 Fonction de dégradation du CO_2

La fraction résiduelle du CO_2 dans l'atmosphère est fonction non pas de sa dégradation (celui-ci ne se dégrade pas), mais de l'absorption par différents puits de carbone (océans et biosphère). Elle s'exprime à l'aide du modèle de Bern (Equation 6).

$$C_{CO2}(t) = a_0 + a_1.e^{\frac{-t}{\tau_1}} + a_2.e^{\frac{-t}{\tau_2}} + a_3.e^{\frac{-t}{\tau_3}}$$

Équation 6

Où τ_i correspond à différentes constantes de temps obtenues par simulation.

La Figure 12 présente la fraction résiduelle de CO_2 suite à une émission selon les modèles de Bern utilisés dans les rapports du GIEC, depuis le 1er rapport en 1990 jusqu'aux modèles les plus récents (Joos et al., 2013), en prenant en compte les évolutions de concentration en CO_2 atmosphérique. On constate que plus le modèle utilisé est récent, plus la fraction restant dans l'atmosphère est importante. Cela est dû à un effet de saturation des puits de carbone, en particulier des océans.

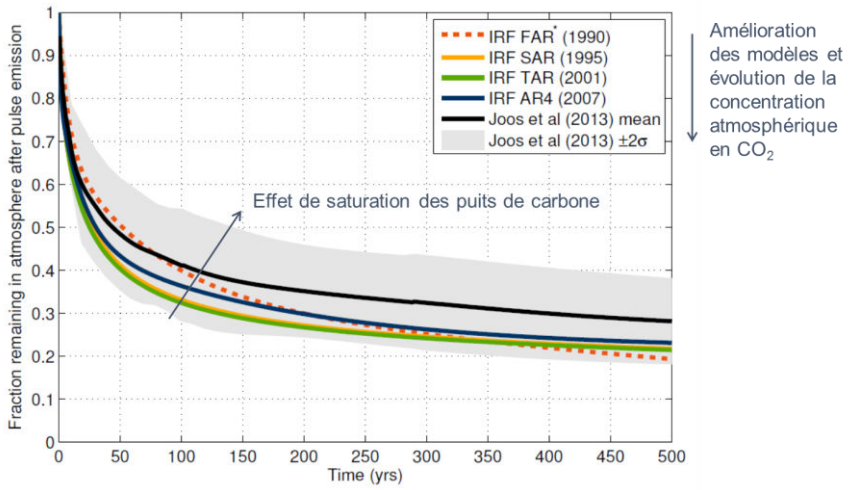


Figure 12 : Evolution de la quantité de CO_2 dans l'atmosphère suite à un pulse d'émission selon les différents rapports du GIEC, d'après Myhre et al., (2013)

6.3.2 Fonction de dégradation des autres GES

Pour tous les autres GES que le CO_2, le terme *Ci(t)* est décrit par une cinétique du premier ordre à l'aide de l'équation 7, où τ_i est la durée de vie spécifique de chaque GES. La vitesse de dégradation est donc proportionnelle à la concentration du GES dans l'atmosphère.

$$C_i(t) = e^{-t/\tau_i} \qquad \text{Équation 7}$$

Les durées de vie τ_i sont mises à jour dans chaque rapport du GIEC (

Tableau 7).

Tableau 7 : Evolution des durées de vie (τ_i) pour les trois principaux GES entre les 3ème, 4ème et 5ème rapports du GIEC

		Durées de vie (années)		
Rapport du GIEC		TAR	AR4	AR5
GES	CO_2	-	-	-
	CH_4 fossile	12	12	12.4
	N_2O	114	114	121

6.4 Sensibilité climatique cj et temps de réponse du système climatique dj

La sensibilité climatique (caractérisant la réponse de la température de l'atmosphère à un forçage radiatif) est de 1.06 K.(W m^{-2})$^{-1}$ dans le dernier rapport du GIEC (Myhre et al., 2013). Les incertitudes associées à ce terme peuvent être importantes, et participent à l'incertitude globale pus importante pour le GTP que pour le GWP.

6.5 Temps de réponse du système climatique dj

Le temps de réponse du système climatique (qui s'exprime en années) est principalement affecté par la dynamique d'absorption de la chaleur par les océans.

6.6 Evolution des métriques au cours des rapports du GIEC

Le Tableau 8 présente l'évolution des valeurs des GWP des principaux GES entre les 3ème, 4ème et 5ème rapports du GIEC pour le CO_2, le CH_4 et le N_2O. Pour le CO_2, cette valeur reste inchangée, par définition du GWP. On constate que pour le CH_4, cette valeur augmente au cours des différents rapports, que ce soit pour un horizon temporel de 20 ans ou de 100 ans. Pour le N_2O, la dynamique est légèrement différente, avec une hausse des GWP (20 et 100) entre le 3ème et le 4ème rapport, puis un retour à des valeurs très voisines de celles du 3ème rapport dans le 5ème rapport.

Tableau 8 : Evolution des GWP20 et GWP100 pour les trois principaux GES entre les 3ème, 4ème et 5ème rapports du GIEC

Indicateurs ($kgCO_2eq/kg$)		GWP 20			GWP100		
Rapport du GIEC		TAR	AR4	AR5	TAR	AR4	AR5
GES	CO_2	1	1	1	1	1	1

	CH_4 fossile	62	72	85	23	25	30
	N_2O	275	289	264	296	298	265

Le Tableau 9 présente quant à lui l'évolution des valeurs des aGWP des principaux GES entre les 3ème, 4ème et 5ème rapports du GIEC pour le CO_2, le CH_4 et le N_2O.

Tableau 9 : Evolution des aGWP20 et aGWP100 pour les trois principaux GES entre les 3ème, 4ème et 5ème rapports du GIEC

Indicateurs ($W.m^{-2}.yr.kg^{-1}$)		aGWP 20			aGWP100		
Rapport du GIEC		TAR	AR4	AR5	TAR	AR4	AR5
GES	CO_2	$2.07\ 10^{-14}$	$2.47\ 10^{-14}$	$2.49\ 10^{-14}$	$6.96\ 10^{-14}$	$8.69\ 10^{-14}$	$9.17\ 10^{-14}$
	CH_4 fos	$1.28\ 10^{-12}$	$1.78\ 10^{-12}$	$2.11\ 10^{-12}$	$1.60\ 10^{-12}$	$2.17\ 10^{-12}$	$2.73\ 10^{-12}$
	N_2O	$5.69\ 10^{-12}$	$7.14\ 10^{-12}$	$6.58\ 10^{-12}$	$2.06\ 10^{-11}$	$2.59\ 10^{-11}$	$2.43\ 10^{-11}$

Les GTP, même s'ils sont mentionnés dans le 4ème rapport du GIEC, ne sont disponibles pour les différents GES que dans leur dernier rapport.

7 Facteurs de caractérisation dynamiques

7.1 Rappel sur le cadre méthodologique de l'ACV dynamique

Pour rappel, en ACV, les aspects temporels peuvent être considérés soit lors des phases d'inventaire (ICV), soit lors de l'étape de caractérisation des impacts (AICV, sur la base d'un ICV dynamique). Le cadre général de l'ACV dynamique (Collinge et al., 2013) est rappelé ci-dessous :

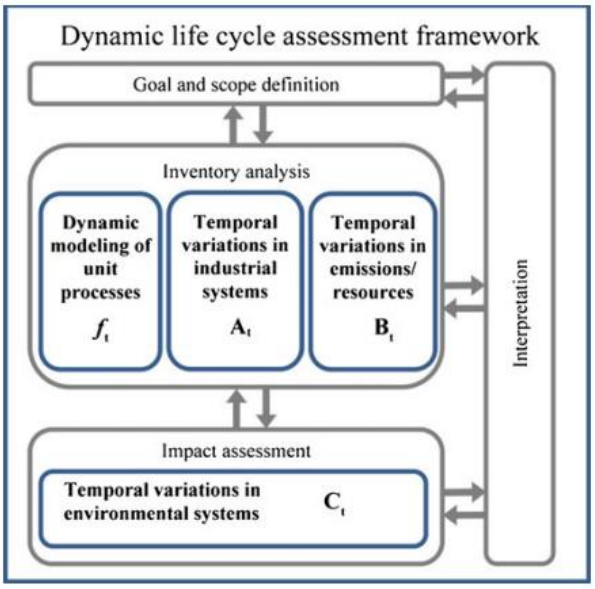


Figure 13: Schéma conceptuel du cadre de l'ACV dynamique

C'est notamment dans le domaine du bâtiment, pour lequel les enjeux liés à la prise en compte des dynamiques temporelles est particulièrement important, que le cadre complet de l'ACV dynamique peut être appliqué :

- le vecteur de demande (f_t) peut varier en fonction de la période de l'année (e.g. consommations d'énergie en fonction de la saison)[4],
- la matrice de la technosphère (A_t) varie au cours de la durée de vie du bâtiment (mix énergétique évolutif sur plusieurs dizaines d'années),
- la matrice de la biosphère (B_t) varie également du fait
    - des émissions retardées entre la construction et la fin de vie du bâtiment ainsi que
    - des aspects de captation liées au carbone biogénique,
- les facteurs de caractérisation (C_t), enfin, évoluent également du fait des dynamiques temporelles liées aux Gaz à Effet de Serre (cf 7.2 ci-dessous). A noter qu'une distribution temporelle de l'inventaire (f_t, A_t, B_t) est un prérequis pour pouvoir réaliser une caractérisation des impacts dynamique (C_t).

7.2 Présentation

L'absence de considération des dynamiques temporelles dans l'évaluation de l'impact des gaz à effet de serre peut poser un problème au niveau de la cohérence dans les profils temporels impliqués dans le cycle de vie d'un produit / d'un service. En effet, quel que soit le moment auquel a lieu l'émission, l'évaluation de son impact sur le réchauffement climatique est toujours faite une fois le délai correspondant à l'horizon temporel choisi écoulé (le plus souvent 100 ans). Par conséquent la période de temps couverte par l'évaluation du changement climatique dépend aussi du profil temporel des émissions du cycle de vie et ne correspond pas uniquement à l'horizon temporel choisi pour le calcul des GWP (le plus souvent 100 ans). La comparaison de produits ayant des profils temporels d'émissions différents entraîne donc une évaluation des résultats sur des périodes de temps différentes, ce qui doit être souligné lors de la phase d'interprétation des résultats. Certain auteurs ont proposé d'utiliser un point fixe dans le temps plutôt qu'une fenêtre d'analyse glissante, à l'aide à la fois d'un inventaire dynamique (émissions distribuées dans le temps), et de facteurs de caractérisation dynamiques (Cherubini et al. 2011, Levasseur et al. 2010, Kendall 2012). Il est important de souligner que l'utilisation d'un point fixe dans le temps conduit à ce qu'une émission se produisant plus tardivement ait un impact moindre (car intégrée sur une plage de temps plus courte) que la même émission ayant lieu plus tôt (Albers et al. 2019c).

[4] Cette temporalité (le mois) ne sera pas abordée dans le présent projet étant donné que les variations associées se font à une échelle temporelle très inférieure à celle de l'indicateur GWP.

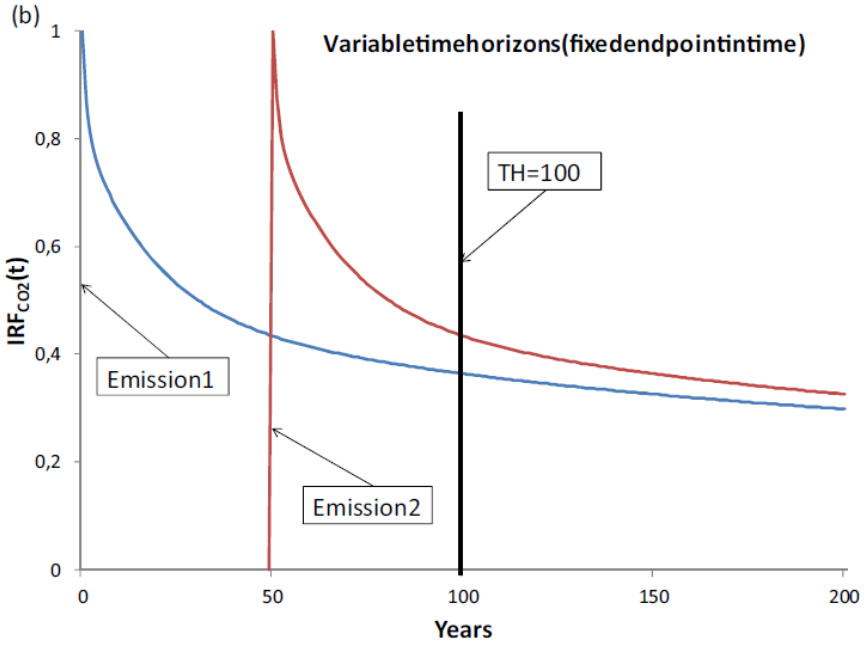


Figure 14 : Horizons temporels variables et analyse à une date fixée, d'après (Levasseur et al. 2016)

7.3 Utilisation

7.3.1 Inventaire dynamique

Un inventaire dynamique en ACV peut être décrit de la manière suivante : Inventaire du cycle de vie (ICV) où la dynamique des systèmes ou la différenciation temporelle sont prises en compte, entraînant des distributions temporelles pour décrire les flux élémentaires. Différentes approches peuvent être utilisées pour générer un inventaire dynamique : la prise en compte des variabilités inhérentes aux systèmes de production, comme la composition des mix électriques à différents pas de temps, la prise en compte de la variabilité temporelle de l'utilisation de certains produits / services (utilisation différente de l'électricité selon les moments de la journée / de l'année…). Ces considérations des aspects temporels au niveau de l'inventaire peuvent aussi passer par des modélisations à plus long terme des systèmes étudiés. Ces modélisations prospectives peuvent reposer sur des simulations, via des modèles d'équilibre généraux ou partiels par exemple, ou sur des approches par scénarios. Il est important de rappeler que quelle que soit la méthode d'inventaire dynamique retenue, la distribution temporelle des émissions de GES est un prérequis pour pouvoir réaliser une caractérisation des impacts dynamique.

7.3.2 Caractérisation dynamique

(Cherubini et al. 2011, Levasseur et al. 2010, Kendall 2012, Benoist 2009) ont proposé des méthodes similaires reposant sur une distribution temporelle des émissions et sur l'utilisation d'un horizon temporel propre à chacune des émissions, ce qui permet d'évaluer l'impact du changement climatique par rapport à un point fixe de référence dans le futur. Cette approche implique que seuls les impacts jusqu'au point fixe dans le temps sont comptabilisés, ce qui peut être pertinent pour le calcul des délais de compensation pour l'atténuation des émissions liées à l'utilisation des terres, ou pour le calcul des effets des émissions de carbone biogénique de la biomasse à rotation longue (Cherubini et al. 2016) par exemple. Cette approche repose sur le développement de facteurs de caractérisation de manière à considérer pour toutes les émissions le même horizon temporel d'intégration des forçages radiatifs induits. L'utilisation de ces méthodes implique l'élaboration de profils d'émissions temporels par

rapport aux émissions agrégées, comme c'est actuellement le cas dans l'ACV, car il faut connaître le temps écoulé entre chaque émission et le point final fixé dans le temps sélectionné pour utiliser les bons facteurs de caractérisation. Le résultat correspond alors à la multiplication de chaque émission de GES par un GWP dynamique pour un horizon de temps correspondant au temps écoulé entre le moment de l'émission et la fin de l'horizon temporel choisi pour l'analyse. Dans l'exemple précédent, l'émission ayant lieu à t = 0 est multipliée par le GWP(100), alors que celle ayant lieu à t = 25 est multipliée par le GWP(75) (Figure 15).

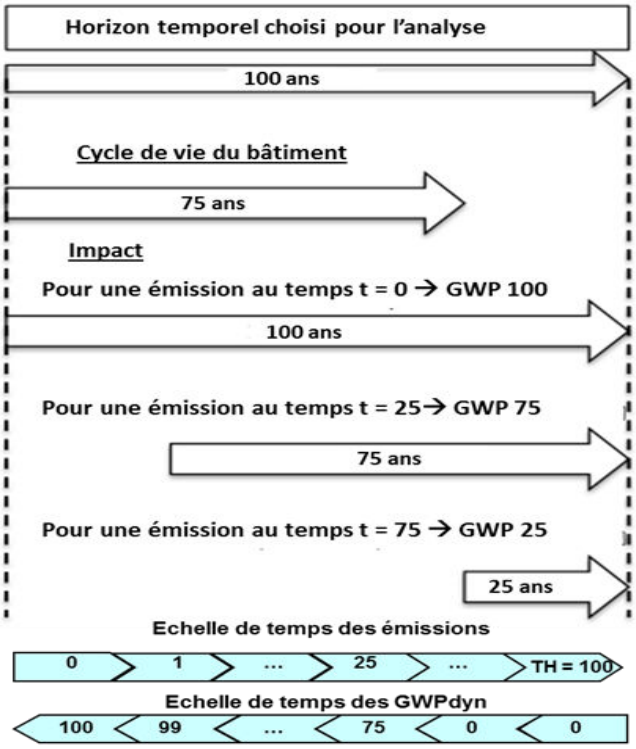


Figure 15 : Représentation de l'utilisation des GWP dynamiques, d'après (Levasseur and Brandão, 2014)

Dans un premier temps, on divise le cycle de vie en périodes d'un an (qui correspond au pas de temps pertinent pour l'évaluation du changement climatique) et on inscrit, pour chaque année et pour chaque GES i, la quantité émise. Pour calculer l'impact sur le changement climatique à une date donnée, on définit ensuite des facteurs de caractérisation dynamiques (DCF). On obtient l'équation 8 en intégrant, pour un GES i, pour chaque pas de temps le forçage radiatif tel que défini par l'équation 1.

$$\boldsymbol{DCF_i(t)_{inst} = \int_{t-1}^{t} a_i \times C_i(t)dt} \qquad \textbf{Équation 8}$$

L'impact instantané sur le forçage radiatif à une date t est alors obtenu en additionnant le forçage radiatif à l'année t de chacune des émissions annuelles précédentes. Les émissions doivent donc être multipliées par le facteur de caractérisation dynamique en utilisant les bornes appropriées : une émission ayant lieu à une date j sera multipliée par le facteur de caractérisation dynamique de la date t-j (Equation 9).

$$\boldsymbol{GWI_{inst}(t) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0}^{t} g_i(j) \times DCF_i(t-j)_{inst}} \qquad \textbf{Équation 9}$$

Par exemple le forçage radiatif instantané à t = 25 se calcule de la manière suivante (Equation 10) :

$$\boldsymbol{GWI_{inst}(25) = g_i(1) \times DCF_i(24)_{inst} + g_i(2) \times DCF_i(23)_{inst} \ldots + g_i(24) \times DCF_i(1)_{inst} + \cdots + g_n(1) \times DCF_n(24)_{inst} + g_i(2) \times DCF_i(23)_{inst} \ldots + g_n(24) \times DCF_n(1)_{inst}}$$

Équation 10

Le forçage radiatif cumulé à une date t est ensuite calculé en sommant les changements climatiques instantanés des années précédentes (Equation 11).

$$\boldsymbol{GWI_{cum}(t) = \sum_{j=0}^{t} GWI_{inst}(j)}$$

Équation 11

Enfin, pour obtenir le GWP d'un GES *i*, le forçage radiatif cumulé du GES *i* est divisé par le forçage radiatif cumulé du CO_2 pour le même horizon temporel (Equation 10).

$$\boldsymbol{GWP_{Dyn} = \frac{GWI_{cum}}{aGWP_{CO_2}}}$$

Équation 12

Cette méthode permet donc de calculer le forçage radiatif pour tous les GES en fonction du temps.
Cette approche dynamique repose uniquement sur des horizons temporels variables. Comme souligné dans les travaux de (Levasseur et al. 2010), d'autres variables dépendent du temps dans le calcul des GWP dynamiques : la fonction de dégradation et l'efficacité radiative. La mise au point de valeurs prospectives tant pour la fonction de dégradation que pour l'efficacité radiative (sous différents scénarios d'évolution de la concentration en GES dans le futur, comme les scénarios RCP) pourraient permettre d'obtenir des facteurs de caractérisation entièrement dynamiques.

7.3.3 Illustrations sectorielles

(Cornillier et al., 2015) ont illustré la double problématique de l'inventaire dynamique et de la caractérisation dynamique de l'impact GWP sur un exemple simple applicable à la fois à la filière bois énergie et à la filière bâtiment.
La mise en place et l'exploitation d'un taillis forestier de 10 ans est considérée : le bois récolté est utilisé pour moitié pour l'énergie (notée « En. »), et pour moitié pour le matériau (noté « Mat. »), pour la fabrication de panneaux d'une durée de vie de 50 ans. L'affectation entre les deux produits est réalisée sur la base du contenu carbone, qui est supposé identique pour les deux produits. Le cycle total de carbone considéré correspond alors à une quantité de 200 kg de carbone, soit l'équivalent de 100 kg de carbone pour chacun des deux produits.
A l'année 0, le taillis est mis en place. Sa croissance est supposée linéaire pendant 10 ans ; la séquestration annuelle correspondante est allouée pour moitié à chacun des deux produits, ceux-ci étant produits en proportions égales et possédant le même contenu carbone. Au terme des 10 ans, l'ensemble du taillis est récolté. L'année suivante, la moitié du carbone récolté est émis sous forme de CO_2, pour la production d'énergie ; l'émission est allouée entièrement à la production d'énergie. L'autre moitié du carbone est émis 50 ans plus tard, lors de la fin de vie des panneaux, à 99 % sous forme de CO_2 et à 1 % sous forme de CH_4; ces émissions sont allouées entièrement à la production de matériaux. Le détail du calcul de l'impact de ces deux produits, selon cette représentation du cycle du carbone et via l'utilisation des GWP ajustés dans le temps à 100 ans, est donné dans le Tableau 10 ci-dessous.

Année	Variation annuelle de stock de carbone en forêt et dans les produits (kg C / an)	Flux de CO_2 (kg CO_2 / an)	Valeur du PRG ajusté dans le temps à 100 ans du CO_2 (kg $CO_{2\text{-éq}}$ / kg CO_2)	Impact du flux de CO_2, évalué via PRG ajustés dans le temps à 100 ans (kg $CO_{2\text{-éq}}$)	Flux de CH_4 (kg CH_4 / an)	Valeur du PRG ajusté dans le temps à 100 ans du CH_4 (kg $CO_{2\text{-éq}}$ / kg CH_4)	Impact du flux de CH_4, évalué via PRG ajustés dans le temps à 100 ans (kg $CO_{2\text{-éq}}$)	Impact total (kg $CO_{2\text{-éq}}$)	
								En.	*Mat.*
0	+ 20	- 73,3	1,0	- 73,3	0	28,0	0	- 36,7	- 36,7
1	+ 20	- 73,3	0,99	- 72,8	0	28,0	0	- 36,4	- 36,4
2	+ 20	- 73,3	0,98	- 72,2	0	28,0	0	- 36,1	- 36,1
3	+ 20	- 73,3	0,98	- 71,6	0	28,0	0	- 35,8	- 35,8
4	+ 20	- 73,3	0,97	- 71,0	0	28,0	0	- 35,5	- 35,5
5	+ 20	- 73,3	0,96	- 70,4	0	28,0	0	- 35,2	- 35,2
6	+ 20	- 73,3	0,95	- 69,9	0	28,0	0	- 34,9	- 34,9
7	+ 20	- 73,3	0,94	- 69,3	0	28,0	0	- 34,6	- 34,6
8	+ 20	- 73,3	0,94	- 68,7	0	28,0	0	- 34,4	- 34,4
9	+ 20	- 73,3	0,93	- 68,1	0	28,0	0	- 34,1	- 34,1
10	- 100	+ 366,7	0,92	+ 337,6	0	28,0	0	+ 337,6	0
60	- 100	+ 363,0	0,48	+ 175,2	+ 1,3	26,9	+ 35,9	0	+ 211,1
Σ	***0***			***- 194,5***			***+ 35,9***	***- 16,0***	***- 142,6***

Tableau 10 : Détail du calcul d'impact, par GWP ajustés dans le temps à 100 ans, de la récolte d'une quantité de bois équivalente à 100 kg de carbone, selon une représentation du cycle du carbone biogénique illustrant l'exploitation d'un taillis forestier de 10 ans pour la production d'énergie et de matériau

L'impact obtenu pour la production d'énergie s'élève à - 16,0 kg CO_2-éq pour une quantité de bois récolté équivalente à 100 kg de carbone, soit un bénéfice du système vis-à-vis du changement climatique.

L'impact obtenu pour la production de matériau s'élève à - 142,6 kgCO_2-éq, pour une quantité de bois récolté équivalente à 100 kg de carbone, soit un bénéfice du système vis-à-vis du changement climatique.

7.4 Application de l'approche dynamique à la prise en compte du carbone biogénique

Le carbone biogénique (Cbio) correspond au carbone provenant de la biomasse, par opposition au carbone fossile (Cfos) qui est issu des roches carbonatées ou carbonées. La principale différence entre le Cbio et le Cfos réside dans la durée des cycles des réservoirs dont ils sont issus. Pour le Cbio, il s'agit d'un cycle « rapide », avec un temps de résidence du carbone dans l'atmosphère de quelques mois à une ou deux centaines d'années au maximum, alors que pour le Cfos, le temps de résidence dans l'atmosphère est de quelques centaines d'années à plusieurs milliers d'années.

Les stratégies bas carbone favorisent l'utilisation de sources d'énergie renouvelables et de biomatériaux provenant, entre autres, de la biomasse forestière et agricole, dédiée et résiduelle. L'objectif d'atteindre la neutralité carbone s'y exprime au travers d'une compensation entre émissions et captations de CO_2. Par ailleurs, l'évaluation du changement climatique induit par les activités humaines se fait via des méthodologies dédiées, comme l'analyse du cycle de vie (ACV) ou l'empreinte carbone par exemple. Cependant les modèles sous-jacents sont statiques car ils représentent uniquement les systèmes dans un état d'équilibre stationnaire. Ainsi, l'inventaire du cycle de vie repose sur une agrégation simplifiée de tous les flux provenant de différentes unités du processus analysé, et par conséquent la variabilité temporelle des flux de carbone (fossiles et biogéniques) est ignorée. Ceci justifie alors l'hypothèse de neutralité climatique des émissions de Cbio puisque les émissions et les séquestrations de carbone par la biomasse ont virtuellement lieu « en même temps ». L'intégration de la dimension temporelle, en distribuant les flux de Cbio au cours de temps, vient questionner cette neutralité climatique. Toutefois, il n'existe pas de consensus sur la façon de modéliser ces flux

dynamiques et de les intégrer dans les méthodes d'évaluation environnementale existantes comme l'ACV.

Comme souligné dans le paragraphe 7.2, il est nécessaire de disposer d'un inventaire dynamique pour obtenir un impact en fonction du temps. Les flux de Cbio doivent donc être désagrégés dans l'étape de l'inventaire, et il faut tenir compte des profils d'émissions temporels (flux de stockage et déstockage) à toutes les étapes du cycle de vie. Ces profils temporels d'émissions / stockage de Cbio ont été proposés de diverses manières dans la littérature, allant du modèle de croissance de la biomasse relativement simple (loi normale, (Cherubini et al. 2011)) à des approches plus complexes (Rosa et al. 2018). Enfin des approches récentes ont proposé de coupler des modèles de croissance de la biomasse forestière (Albers et al. 2019c) ou des modèles de dynamique de carbone organique du sol (Albers et al. 2019a) avec des modèles économiques pour obtenir des émissions distribuées au cours du temps. Le choix de l'ordre de modélisation du cycle du carbone (séquestration-émission ou émission- séquestration) a également un impact très important sur les résultats de la modélisation dynamique du changement climatique. En effet, une séquestration suivie d'une émission tend à diminuer les impacts par rapport à l'hypothèse de neutralité climatique, alors qu'une modélisation émission puis séquestration tend au contraire à accroître ces impacts. Cette décision de modélisation (relation physique causale de l'attribution de Cbio en amont ou en aval d'une activité de récolte) a été identifiée comme un défi d'allocation pour l'ACV attributionnelle. De récents travaux (Albers et al. 2019b) ont établi des recommandations pour les praticiens selon un ensemble de règles dans un arbre décisionnel (Figure 16), selon les états précédents de la forêt (naturelle ou artificielle), en séparant les systèmes gérés des systèmes non gérés et en déterminant si les terres sont destinées à être reboisées après la récolte ou non. Des cas d'étude ont également mis ce sujet en évidence (Fouquet et al., 2015).

Ainsi (cf Figure 16 ci-dessous), il est identifié qu'en ACV conséquentielle, cette question de l'ordre de l'émission/séquestration (ici appelé le « dilemme de la poule et de l'œuf ») ne se pose pas. En ACV attributionnelle en revanche, la distinction se fait par rapport à la nature de la forêt dont est issu le bois. Dans le cas d'un bois issu de forêt gérée durablement (avant récolte), la perspective historique s'impose. En revanche, dans le cas de bois issu d'une forêt non gérée, et qui ne le sera pas à l'avenir (un retour à l'état naturel est donc envisageable), la perspective future doit être retenue. Enfin, dans le cas où le bois exploité n'est pas issu d'une forêt gérée durablement mais que la gestion est envisagée par la suite (ou qu'une culture est prévue), aucune séquestration de carbone n'est à envisager.

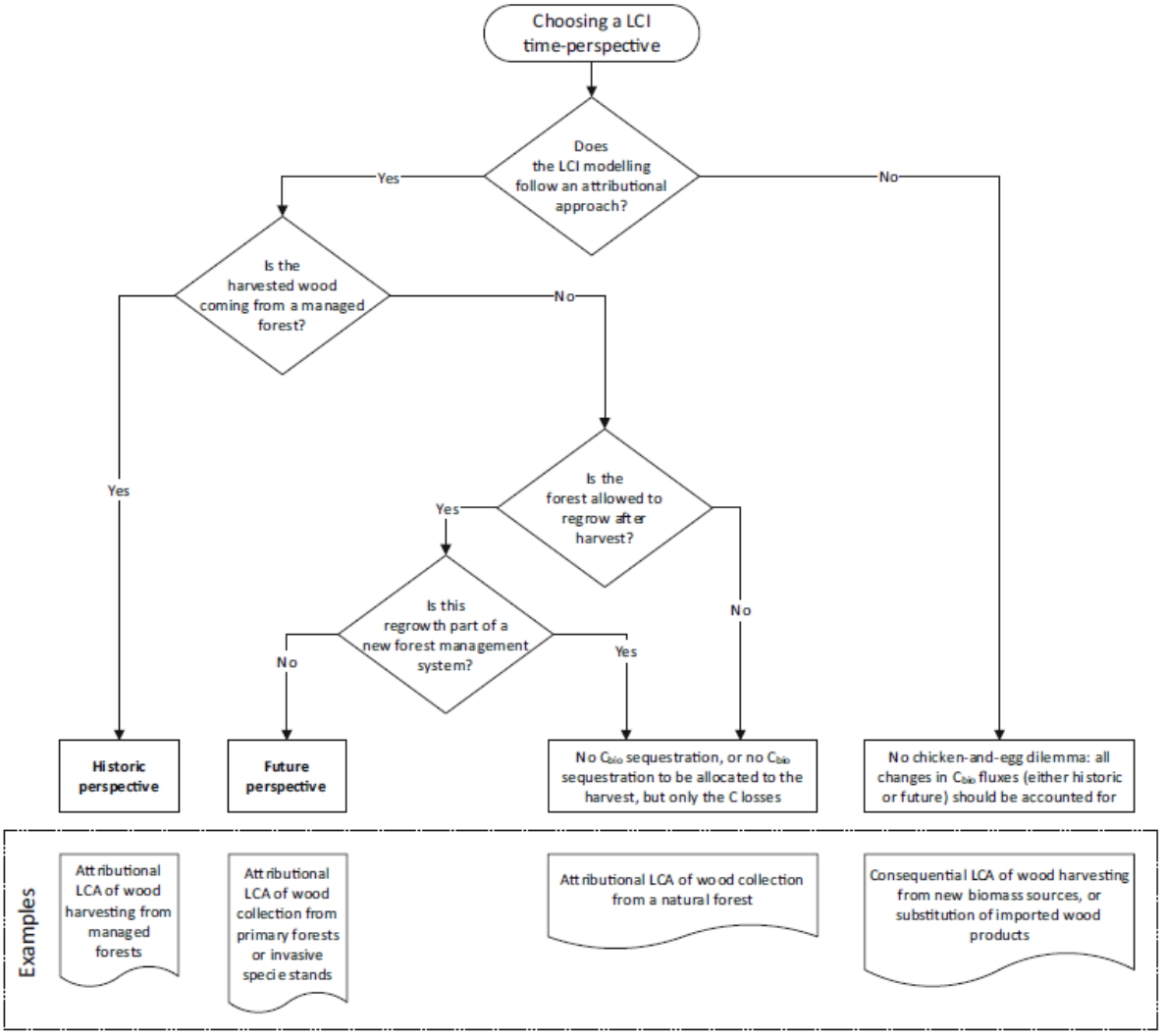


Figure 16 : Arbre de décision pour l'allocation de la séquestration du CO_2 à une activité de la récolte de la biomasse, d'après (Albers et al. 2019b)

7.5 Revue bibliographique des normes, référentiels et guides méthodologiques

Les toutes dernières versions de chacune des normes, référentiels et guides méthodologiques sont ici considérées. L'objectif ici est de mettre à jour les connaissances concernant ces différents référentiels et d'identifier les mises à jour effectuées depuis la dernière étude réalisée par SCORE LCA. La description détaillée des référentiels et de leurs enjeux peut être trouvée dans le rapport SCORE LCA 2013-02.

Référentiel	**Application**	**ICV dynamique**	**AICV dynamique**	**Secteurs cités en exemple**
Product Environmental Footprint 2013/179/EU	Lignes directrices ACV	Non	Non (IPCC 2007)	Forêt (émissions retardées, sur exemple de 120 ans)
PEFCR Guidance : version 6.3 - May 2018	Lignes directrices ACV	Non	-FC CH_4 = 36,75 (vs 34 dans l'IPCC) pour prendre en compte l'oxydation totale de méthane en CO_2 (stœchiométrie)	NA
ILCD Handbook	Lignes directrices ACV	Oui (si figure dans l'objectif de l'étude) : -Si émission <100 ans : introduction d'un flux "Correction flow for delayed emission of biogenic *(or fossil, NDLR)* carbon dioxide (within first 100 years)" pour conserver un impact sur 100 ans à partir de la date de construction, et donc réduire l'impact des émissions retardées (on n'intègre les impacts de l'émission retardé que sur les années qui séparent la date d'émission de 100ans : la date de fin d'intégration). Flux en kg.an, et FC = -0.01 kg CO2-eq./(kg*a) -Si émission >100ans; <100 000ans : flux tagué "long term" (non caractérisée dans les méthodes actuelles==> A vérifier -Si émission >100 000 ans : 0 émission	Non ? Méthode d'ICV correspond-elle à un GWP dynamique ?	Bâtiment
EN 15804:2012+A2:2019	Référentiel sectoriel (bâtiment)	Non : Ensemble des inputs et outputs sous 100 ans	Non	NA : Construction
ISO 14067:2018	Empreinte carbone produit	Non : Calcul des émissions GES comme si elles avaient lieu à t_0 (période d'évaluation) Si décalage dans le temps (>10ans, ou cf PCR pertinent), effet à	cf IPCC 2013	-Forêt : les évolutions du stock de carbone sont généralement réparties de façon linéaire sur la période de temps spécifiée. La période de temps appropriée peut être

Référentiel	**Application**	**ICV dynamique**	**AICV dynamique**	**Secteurs cités en exemple**
		calculer séparément + détailler la méthode de calcul de cet effet dans le rapport.		la durée de la période de rotation moyenne pour les produits ligneux récoltés[…]
PAS 2050 : 2008 + 2011	Empreinte carbone produit	Non : Impact du stockage de carbone (bois, ciment) sur 100 ans considéré pour les produits : -hors food/feed -dont plus de 50% de la masse du carbone biogénique reste piégé plus d'un an après sa production -issus un intrant qui est le résultat d'actions humaines qui provoquent sa formation dans le but de l'utiliser comme intrant dans un processus (e.g. forêts gérées durablement) -réutilisés ou recyclés issus du point ci-dessus. Sur la base du contenu carbone.	Oui pour Feed/food : CF CH_4 = 22,25 pour prendre en compte la dégradation en CO2 biogénique	Forêt.
Climate declaration : EPD® SYSTEMVERSION 3.01 2019-09-18	Empreinte (carbone) produit	Non : Impact du stockage de carbone (bois, ciment) sur 100 ans considéré	Non	Bois
GHG Protocol	Empreinte carbone produit	Impacts des émissions retardées non prises en compte (les entreprises peuvent montrer l'impact des émissions et des absorptions différées séparément des résultats de l'inventaire.)	Non	NA

7.6 Evaluation dynamique du changement climatique : bibliographie scientifique

Le tableau ci-dessous résume les approches proposées dans différentes publications scientifiques traitant de l'ACV dynamique.

Etude / Publication	**Secteur + Objectifs**	**Horizon temporel (GWP ou GTP)**	**Facteurs de caractérisation**	**Indicateur GTP?**	**ICV dynamique**	**AICV dynamique**	**Cas d'étude:**	**Notes (carbone biogénique ou autre)**	**Résultats**
(Cornillier et al., 2015) *Etude préliminaire à la réalisation de bilans environnementaux sur le chauffage au bois. Partie 1 : Etat de l'art. Ademe.*	Energies Projet ADEME, orientation de politiques énergétiques	GWP 100ans + 20 ans en sensibilité	IPCC 2013	Non, seulement en sensibilité (20, 50, 100 ans)	Oui sur le changement d'usage des sols (flux de CO2 associés) : limites identifiées lors de la mise en œuvre.	Oui, (méthode projet + Müller Wenk) et les GWP ajustés dans le temps.	Bois Energie		
(Collinge et al., 2014) *Productivity metrics in dynamic LCA for whole buildings: Using a post-occupancy evaluation of energy and indoor environmental quality tradeoffs. Build.*	Bâtiment Comparer ACV statique et dynamique dans le cadre d'une ACV de bâtiment. Evaluation au moment de la rénovation du bâtiment et avec une approche "durée de vie complète" vs " vie restante".	100 ans	Kendall 2012	Non	Oui	Oui : Time-adjusted (global) warming potentials (TAWPs); 2009–2045 (Kendall2012)	Bâtiment, avec deux approches : "duré de vie complète" vs. "durée de vie restante"	-Les auteurs notent l'importance de considérer également de façon dynamique les opérations de maintenance du bâtiment (remplacement de certaines parties etc.)	Variation faible entre statique et dynamique sur le CO2, due offset entre gains en émission de CO2 et augmentation des conso d'énergie**.==> A creuser. Lié à l'ICV utilisé?**

Etude / Publication	**Secteur + Objectifs**	**Horizon temporel (GWP ou GTP)**	**Facteurs de caractérisation**	**Indicateur GTP?**	**ICV dynamique**	**AICV dynamique**	**Cas d'étude:**	**Notes (carbone biogénique ou autre)**	**Résultats**
(Fouquet et al., 2015) *Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment. Build. Environ*	Bâtiment Comparer approches dynamique et statique en intégrant la prise en compte des aspects carbone biogénique par une approche de comptabilité totale, avec 2 scenarii de fin de vie pour la maison bois (incinération et mise en décharge)	100 ans, 500 ans	Levasseur et al. 2010	Non	Oui : carbone capté après récolte (et carbone capté avant récolte en analyse de sensibilité) car bois exploité d'une forêt naturelle replantée après exploitation.	Oui : Levasseur et al 2010	Maison individuelle bois vs. béton armé vs. blocs béton.	-NB : Usage de SimaPro et Ecoinvent. -Les absorptions et émissions de CO_2 liées au bois pour la maison en bois (OB) selon les lignes directrices du GHG Protocol. -NB : inventaire annualisé disponible pour un scenario maison bois incinérée et maison bois mise en décharge (émissions de CH_4 sur 150 ans récupérées). -Scenarii de gains techno dans la production des éléments liés aux opérations de maintenance (panneaux de particules) issus de Gabel K, Tillman A-M. Simulating operational alternatives for future cement production. J Clean Prod 2005;13:1246e57..	-le scénario de la mise en décharge a moins d'impact que le scénario de l'incinération car 97% du carbone du bois est considéré comme séquestré de façon permanente dans la décharge. En outre, 75 % du méthane libéré est supposé être récupéré et libéré dans l'atmosphère sous forme de CO_2.
(Roux et al., 2016) *Integrating climate change and energy mix scenarios in LCA of buildings and districts.*	Bâtiment Evaluer les impacts du cycle de vie des bâtiments, en intégrant les effets du changement climatique (scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 du GIEC, fixant la consommation mensuelle énergétique du bâtiment et leur dynamique	Non précisé	Non précisé	Non	Oui	Non précisé	Maison individuelle FR		

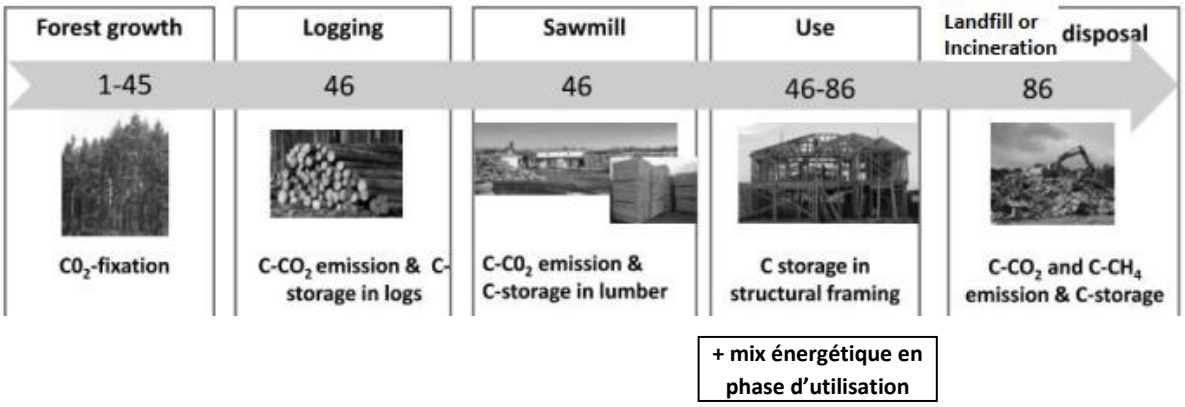
Etude / Publication	**Secteur + Objectifs**	**Horizon temporel (GWP ou GTP)**	**Facteurs de caractérisation**	**Indicateur GTP?**	**ICV dynamique**	**AICV dynamique**	**Cas d'étude:**	**Notes (carbone biogénique ou autre)**	**Résultats**
	mensuelle) et l'évolution du mix énergétique sur le long terme (à 2050)).								
(Negishi et al., 2018) *An operational methodology for applying dynamic Life Cycle Assessment to buildings.*	Bâtiment Une méthodologie opérationnelle pour appliquer l'analyse dynamique du cycle de vie aux bâtiments	Analyse en cours		Non	Oui : outil DyPLCA permettant le paramétrage dynamique de type évolution de la performance d'isolation, évolution vers des matériaux biosourcés, scenario mix énergétiques prospectifs… Données d'arrière plan : Ecoinvent 3.2	Oui : outil DyPLCA. Méthodologie basée sur IPCC, laisse donc penser que le terme « GWP dynamique est galvaudé ici.	Non présenté	Cadre général d'intégration du temps dans toutes les dimensions du bâtiment (variation saisonnières, GES dynamique…) http://dyplca.pigne.org/	
(Liu et al., 2018) *Integrate carbon dynamics models for assessing the impact of land use intervention on carbon sequestration ecosystem service.*	Intégrer des modèles de dynamique du carbone pour évaluer l'impact des interventions en matière d'utilisation des terres sur le service écosystémique de séquestration du carbone	500 ans +		Non			Site US	Evaluation de la dynamique de séquestration du carbone en fonction du type d'usage du sol ➔ Etude hors scope.	
(Yan, 2018) *Integrate carbon dynamic*	Intégrer des modèles dynamiques du carbone dans l'analyse de l'impact	De 20 à 500 ans	IPCC (Cherubini et al., 2011;	Non	Oui	Calculés spécifiquement en prenant en			

Etude / Publication	**Secteur + Objectifs**	**Horizon temporel (GWP ou GTP)**	**Facteurs de caractérisation**	**Indicateur GTP?**	**ICV dynamique**	**AICV dynamique**	**Cas d'étude:**	**Notes (carbone biogénique ou autre)**	**Résultats**
models in analyzing carbon sequestration impact of forest biomass harvest.	de la récolte de la biomasse forestière sur la séquestration du carbone		Zeng et al., 2013)			compte la séquestration du carbone dans les océans (à la différence de (Levasseur, 2010).			
(Faraca et al., 2019) *Dynamic accounting of greenhouse gas emissions from cascading utilisation of wood waste.*	Comptabilisation dynamique des émissions de gaz à effet de serre provenant de l'utilisation en cascade des déchets de bois	100 ans	IPCC (Cherubini et al., 2011; Zeng et al., 2013)	Non	Oui	Oui	Recyclage de bois en fin de vie		les avantages semblent plus importants lorsque : i) le nombre d'étapes de la cascade dans le système augmentait, ii) l'application de recyclage avait une longue durée de vie, et iii) l'application de recyclage remplaçait des matériaux à forte intensité énergétique.

On constate que dans l'ensemble, toutes les études se basent sur la caractérisation dynamique du GWP en utilisant (Levasseur et al, 2010).

8 Cas d'étude : description

8.1 Le périmètre et les hypothèses



Les valeurs indiquées ici sont issues de la thèse d'Ariane Albers « Prise en compte de la dimension temporelle dans l'évaluation environnementale des produits de la biomasse: Modélisation dynamique du carbone », Chapitre 3.

Le bâtiment considéré est une maison individuelle en ossature bois de 130 m² habitable[5]. Par souci de simplification, seuls les éléments constitutifs en bois sont modélisés[5] :
- infrastructure : pas de bois
- superstructure :
. paroi extérieure porteuse isolée au rez-de-chaussée et étage : 0,045 m^3/m^2 de surface habitable (SH)
. paroi extérieure porteuse non isolée (rdc) : 0,036 m^3/m^2 SH
. parement extérieur, ossature bois : 0,005 m^3/m^2 d'ossature ;
. paroi intérieure porteuse non isolée : 0,040 m^3/m^2
. plancher intermédiaire isolé solivage bois : 0,035 m^3/m^2
. plancher intermédiaire non isolé : 0,030 m^3/m^2
- couverture : charpente 0,0065 m^3/m^2 SH

Au total cela représente 0,256 m^3 de bois par m² SH. En prenant une masse volumique de 440 kg/m^3 [6] on a donc 113 kg de bois / m² SH soit 14 643 kg de bois pour la maison de 130 m². En considérant en moyenne une masse totale de 1 800 kg / m² pour un bâtiment en ossature bois, donc de 234 000 kg pour 130 m², la part de bois représente donc 6% de la masse totale du bâtiment.

La phase d'utilisation de durée 41 ans, est modélisée par du chauffage 100% électrique (de manière à pouvoir tester un mix prospectif) avec l'hypothèse de 120 kWh/m²/an[7] donc 15 600 kWh / an (besoin énergétique moyen pour le chauffage uniquement) donc de 639,6 MWh pour 41 ans.

[5] Qualité environnementale des bâtiments - ISO 14040 – 14044 ET NF P 01-010 - Recherche des paramètres influençant la qualité environnementale des bâtiments à basse consommation énergétique. Comparaison des impacts environnementaux. Collection Technique CIM béton. Page 229

[6] Donnée Ecoinvent 3.6 « *Sawlog and veneer log, softwood, measured as solid wood under bark {CH}| softwood forestry, mixed species, sustainable forest management* »

[7] Les avis de l'ADEME. Modes de chauffage dans l'habitat individuel. 2014. https://www.caue71.fr/documentation/ademe-avis-modes-chauffage-individuels.pdf

La fin de vie considérée pour le bois de construction une fois le bâtiment arrivé en fin de vie suit la répartition suivante[8] :

% mis en centre de stockage de déchets non dangereux (CSDND)	% incinéré dans UIOM avec récupération d'énergie	% Envoyé sur plateforme de tri	
		% incinéré dans UIOM avec récupération d'énergie (fines de broyage)	% de bois acheté comme matière première secondaire par les usines de panneaux de particules bois
17,3%	15,4%	10,1%	57,2%

Figure 17 : Répartition des différents traitements de fin de vie pour le bois de construction

8.2 Les données utilisées et hypothèses

8.2.1 Données génériques

Ce cas d'étude est modélisé dans le logiciel SimaPro 9.1.1.1 grâce à des données de la base de données Ecoinvent 3.6.

Elément	Donnée Ecoinvent utilisée
Bois de construction pour la maison	Sawnwood, softwood, dried (u=20%), planed {RER}| market for
Chauffage	Electricity, low voltage {FR}| market for
Fin de vie : stockage de déchet non dangereux	Waste wood, untreated {CH}| treatment of, sanitary landfill
Fin de vie : incinération dans UIOM (avec récupération d'énergie) dont après plateforme de tri	Waste wood, untreated {CH}| treatment of, municipal incineration | Cut-off, U
Rachat en tant que matière première secondaire par les usines de panneaux de particules bois	Comme recommandé par la norme 15804+A1, le carbone doit être réémis donc cette fin de vie est modélisée par un flux de CO_2 biogénique correspondant à 57,2% du carbone contenu dans le bois (cf paragraphe 8.3.1 ci-après).

Pour la part de bois enfouie, on considère une dégradation de 15% du bois sur 100 ans[9] (en ACV statique, seules les émissions liées à ces 15% de dégradation sont donc considérées).

[8] Rapport d'étude Volet 2 – Prise en compte de la fin de vie des produits bois – Phase 1 : Etat de l'art sur les scénarios de fin de vie des produits bois. FCBA. SynerBois Partenaires. CSTB. 2012

[9] Rapport d'étude Volet 2 – Prise en compte de la fin de vie des produits bois – Phase 3 : Modélisation de la fin de vie des produits bois. FCBA. SynerBois Partenaires. CSTB. 2012

8.3 Caractérisation des principaux gaz à effet de serre

8.3.1 Cas particulier du carbone biogénique

L'impact du cycle de vie de notre système (en considérant donc la production de l'ossature bois, la phase d'utilisation chauffage, et la fin de vie par incinération et enfouissement) sur l'indicateur GWP est calculé avec la méthode IPCC 2013 GWP 100a version 1.03.
Cette méthode suit l'hypothèse de la neutralité CO_2[10] : les flux « *Carbon dioxide, in air* » (prélèvement de CO_2 dans l'atmosphère) et « *Carbon dioxide, biogenic* » (émission de CO_2 biogénique dans l'air) ne sont pas caractérisés.

8.3.2 Caractérisation des flux de substances contribuant à l'indicateur GES

On identifie les principaux gaz contributeurs au GWP que l'on compare à la quantité émise dans l'air (donnée par l'inventaire réalisé par SimaPro) :

Tableau 11 : Flux et impacts GES associés dans le cas statique

	Impact GWP		**Quantité émise dans l'air**	
	en kg CO_2 eq.	**en % par rapport à l'impact total**	**en kg**	**en % par rapport à la quantité de ces 10 émissions**
Carbon dioxide, fossil	55 843	87,17 %	55 843	**99,55%**
Methane, fossil	3 414	5,33 %	112	**0,20%**
Methane, biogenic	1 799	2,81 %	65	**0,12%**
Dinitrogen monoxide	1 482	2,31 %	6	**0,01%**
Sulfur hexafluoride	908	1,42 %	0,04	< 0,001%
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	491	0,77 %	0,1	< 0,001%
Carbon dioxide, land transformation	69	0,11 %	69	0,12%
Methane, tetrafluoro-, CFC-14	29	0,05 %	0,004	< 0,001%
Ethane, hexafluoro-, HFC-116	8	0,01 %	0,001	< 0,001%
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	7	0,01 %	0,004	< 0,001%
Flux restants	*9*	*0,01 %*		
Impact total GWP	**64 058**			

Les émissions de CO_2 fossile (le CO_2 biogénique n'étant pas caractérisé) représentent au total 87% de l'impact, pour plus de 99% en masse par rapport à la masse totale des 10 émissions expliquant la quasi-totalité de l'impact.
Le méthane (fossile et biogénique), représentant en masse 0,32% des émissions, explique 8,14% de l'impact.
L'oxyde nitreux (*dinitrogen monoxide* en anglais), représentant en masse 0,01% des émissions, explique 2,31% de l'impact.

[10] Dans sa version 1.03 disponible sous le logiciel SimaPro v9.1.1.1.

Quant à l'hexafluorure de soufre, il contribue à un peu plus de 1% à l'impact malgré sa contribution massique extrêmement faible.

9 Analyses de sensibilité

9.1.1 Considération statique : comparaison selon les facteurs de caractérisation

9.1.1.1 Versions de la méthode IPCC

9.1.1.1.1 Méthode d'intégration à l'ACV

On compare, toujours sur le cycle de vie, les variations entre les résultats obtenus par les versions suivantes de la méthode IPCC (versions recommandées par la littérature) :
IPCC 2007 GWP 100a versus IPCC 2013 GWP 100a, cette dernière détaillant les impacts dus aux flux fossiles, biogéniques et à l'occupation et changement d'occupation du sol. *Aucune des deux méthodes ne caractérise les flux « Carbon dioxide, in air » et « Carbon dioxide, biogenic », ceci étant valable pour la suite sauf contre-indication*.

Rapport	AR4 (2007)		AR5 (2014)			
TH (ans)	20	100	20		100	
CO_2	1	1	1	-	1	-
CH_4	72	25	84	↗	28	↗
N_2O	289	298	264	↘	265	↘
CFC-11	6730	4750	6900	↗	4660	↘
SF6	16300	22800	17500	↗	23500	↗

9.1.1.1.2 Résultats :

	IPCC 2013	IPCC 2007	Différence
GWP 100a (kg CO_2 eq.)	64 058	63 329	1,1 %

→ La différence entre les deux versions de la méthode est faible.

9.1.1.2 Prise en compte du feedback

Rappel théorique :

Le changement climatique influence le cycle global du carbone en influant sur les taux de respiration et de photosynthèse des sols. Ce type de rétroaction (ou « feedback ») est observé pour les gaz à effet de serre (CO_2, CH_4, N_2O etc.), mais aussi pour la vapeur d'eau (l'augmentation de la température induite par les émissions de GES induit une augmentation de la concentration en vapeur d'eau dans l'atmosphère, qui elle-même conduit à un renforcement de l'effet de serre).

9.1.1.2.1 Méthode d'intégration à l'ACV

On analyse ici l'influence de la prise en compte des feedbacks de plusieurs gaz comme recommandé par l'UNEP/SETAC 2016, recommandation reprise par le PEF 2018, en comparant l'analyse par la méthode :

IPCC 2013 GWP 100a versus IPCC 2013 GWP100a incluant les feedbacks de plusieurs gaz comme indiqué ci-après.

Table 3.3: Characterization factors for the short-term and long-term climate change impact categories for a selection of WMGHGs

Values include climate-carbon feedbacks. See Table 8.SM.15 in the supplementary information of WGI Chapter 8 of the IPCC for the remaining gases (Myhre et al., 2013). This should not be confounded with Table 8.A.1 of the appendix that includes feedbacks for CO_2 only and not for the other WMGHGs.

WMGHG	Chemical formula	Lifetime (years)	Shorter-term climate change	Long-term climate change	
			GWP20[2]	GWP100	GTP100
Carbon dioxide	CO_2	Indefinite	1	1	1
Methane[1]					
Biogenic	CH_4	12.4	86	34	11
Fossil	CH_4	12.4	87	36	13
Nitrous oxide	N_2O	121	268	298	297
HCF-134a	CH_2FCF_3	13.4	3 790	1 550	530
CFC-11	CCl_3F	45	7 020	5 350	3 490
PFC-14	CF_4	50 000	4 950	7 350	9 560
Sulphur hexafluoride	SF_6	3 200	17 783	26 087	33 631

[1] Values for biogenic methane do not include contributions from methane oxidation to CO_2, while those for fossil methane do. We did not discuss how biogenic CO_2 should be treated in the life cycle inventory step during this workshop.

[2] For sensitivity analysis only.

Figure 18 : Facteurs de caractérisation incluant le feedback, utilisés pour l'analyse de sensibilité pour le GWP à l'horizon 100 ans- Source : UNEP/SETAC, Global Guidance on environmental life cycle

Les facteurs de caractérisation des substances suivantes émises dans l'air sont ainsi adaptés dans la méthode sous SimaPro :

Nom et formule de la substance d'après UNEP/SETAC	**Nom du flux caractérisé correspondant**	**Numéro CAS**	**FC initial sans prise en compte du feedback**	**FC avec prise en compte du feedback**	**Variation du FC entre sans et avec prise en compte des feedbacks**
Methane biogenic - CH_4	Methane, biogenic	74-82-8	27,75	34	23%
Methane fossil - CH_4	Methane, fossil	74-82-8	30,5	36	18%
Nitrous oxide - N_2O	Dinitrogen monoxide	10024-97-2	265	298	12%
HCF-134a – CH_2FCF_3	Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	811-97-2	1300	1550	19%
CFC-11 – CCl_3F	Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	75-69-4	4660	5350	15%
PFC-14 – CF_4	Methane, tetrafluoro-, CFC-14	75-73-0	6630	7350	11%
Sulphur hexafluoride - SF_6	Sulfur hexafluoride	2551-62-4	23500	26097	11%

9.1.1.2.2 Résultats :

	IPCC 2013 sans feedback	IPCC 2013 avec feedback	Différence
Impact total (kg CO_2 eq.)	64 058	65 367	2%

Nom et formule de la substance d'après UNEP/SETAC	Nom du flux caractérisé correspondant	Contribution de la substance au GWP total sans feedback	Contribution de la substance au GWP total avec feedback
Methane biogenic - CH_4	Methane, biogenic	2,8 %	3,4 %
Methane fossil - CH_4	Methane, fossil	5,3 %	6,2 %
Nitrous oxide - N_2O	Dinitrogen monoxide	2,3 %	2,5 %
HCF-134a – CH_2FCF_3	Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	contribue à moins de 0,01%	contribue à moins de 0,01%
CFC-11 – CCl_3F	Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	contribue à moins de 0,01%	contribue à moins de 0,01%
PFC-14 – CF_4	Methane, tetrafluoro-, CFC-14	0,05 %	0,05 %
Sulphur hexafluoride - SF_6	Sulfur hexafluoride	1,4 %	1,54 %
TOTAL en contribution		11,9 %	13,7 %

→ La différence d'impact total entre les deux versions de la méthode est de 2 %. Cette différence de 2% est donc due à la prise en compte du phénomène de feedback pour 5 substances, or la contribution totale de ces 5 substances au GWP n'est que de 1,8 % plus élevée en tenant compte du feedback par rapport à la méthode sans tenir compte du feedback.

On constate donc que la variation est faible, du fait de la faible émission de substances concernées par le feedback dans le système étudié (bâtiment à ossature bois).
Pour illustrer la plage de variation possible liée à ces feedbacks, étudions deux autre systèmes. L'analyse est faite sur deux autres exemples dans lesquels les substances adaptées pour prendre en compte le feedback sont émises en plus grande quantité : comparaison des deux méthodes sur :
- 1 kWh du mix électrique français basse tension (donnée Ecoinvent « Electricity, low voltage {FR}| market for ») : on sait que ce système est intensif en émissions fugitives de SF_6 (sulfur hexafluoride), gaz utilisé dans les transformateurs.
A titre indicatif, le passage du haut voltage au voltage moyen émet $5{,}7.10^{-8}$kg de SF_6 par kWh d'électricité basse tension.
- 1 kg de viande de bœuf en poids vif (donnée Ecoinvent « Cattle for slaughtering, live weight {BR}| market for cattle for slaughtering, live weight ») : ce système est particulièrement intensif en émissions de CH_4 et de N_2O, deux gaz dont le FC est sensible à la prise en compte des feedbacks (+23% et +12% respectivement).

	IPCC 2013 sans feedback	IPCC 2013 avec feedback	Différence
1 kWh électricité basse tension (impact total en kg CO_2 eq.)	0,093	0,094	1,51 %
1 kg bœuf poids vif (impact total en kg CO_2 eq.)	24,6	27,9	11,8 %

Dans le cas du bœuf, la prise en compte du feedback fait varier l'impact GWP d'environ 12%, ce qui n'est pas négligeable.
Lorsque l'analyse porte sur des systèmes dont on sait que les principaux contributeurs au GWP sont des substances pour lesquelles les facteurs de caractérisation sont sensibles au feedback, il est donc recommandé de présenter les résultats sans prise en compte du feedback, complétés d'une analyse de sensibilité prenant en compte le feedback.

9.1.1.3 Prise en compte des NTCF

Rappel Théorique :

Certains de ces polluants sont des précurseurs de la formation d'ozone troposphérique (NOx, CO, COV), d'autres sont des aérosols primaires (BC, OC) ou des précurseurs d'aérosols secondaires (NOx, SOx) qui peuvent soit absorber (BC) soit diffuser (SOx et OC) le rayonnement solaire.
Ces espèces influent sur le climat par le biais de nombreuses interactions chimiques et physiques non linéaires, notamment en modifiant la durée de vie du méthane, la couverture nuageuse et d'autres effets indirects[11].

9.1.1.3.1 Méthode d'intégration à l'ACV

On analyse ici l'influence de la prise en compte des effets de plusieurs substances classées par l'AR5 en tant que Near Term Climate Forcers (NTCF), comme recommandé par l'UNEP/SETAC 2016 et repris par le PEF 2018 (méthode EF 3.0[12]), en comparant l'analyse par les méthodes :
IPCC 2013 GWP 100a versus IPCC 2013 GWP100a incluant les NTCF.

Table 3.4: CFs for NTCFs for sensitivity analysis
Source: (Myhre et al. 2013)

NTCF	GWP20	GWP100	GTP100
NO_x [1]	−108 ± 35	−29 ± 9	-2 ± 1.9
CO [2]	7.8 ± 2.0	2.1 ± 0.5	-0.2 ± 0.1
VOC [3]	18.7 (±7.5)	5.5 (±2.3)	0.8 (±0.4)
SO_x [4]	-141	-38	-5
OC [5]	−160 (−60 to −320)	-43 (-17 to -86)	-6.7 ± 1.9
BC [6]	3 200 (270 to 6 200)	846 (94 to 1 600)	120 (5 to 313)

Figure 19 : Facteurs de caractérisation des NTCF, utilisés pour l'analyse de sensibilité à l'horizon 100 ans - Source : UNEP/SETAC, Global Guidance on environmental life cycle

Les flux de NO_x, CO, SO_x sont bien inventoriés par la base de données Ecoinvent utilisée.

[11] A noter que l'effet de ces NTCF, par opposition aux « Well Mixed Greenhouse Gases [WMGHG] » que sont les CO_2, CH_4, N_2O, SF_6 etc.) dépend de leur lieu d'émission. Une dynamique géographique pourrait donc s'ajouter à la dynamique temporelle ici.
[12] A noter que la méthode EF3.0 considère les facteurs globaux proposés dans l'AR5 (tableau Table 8.A.5 de (Myhre et al., 2013)) pour les VOC tandis que la valeur UNEP SETAC correspond aux facteurs Europe/Afrique du nord.

En revanche, les émissions de VOC posent question, et le noir de carbone (black carbon, BC) et le carbone organique (organic carbon, OC) ne sont pas caractérisés dans les inventaires Ecoinvent.
Le BC étant une émission caractéristique entre autres des transports, et au vu de son important facteur de caractérisation, il est cependant important de tester son influence sur les résultat.
D'après The Climate and Clean Air Coalition, le BC représente 7% des émissions de CO_2 eq. du secteur transport sur un horizon 100 ans[13]. On analyse donc avec la méthode IPCC 2013 GWP 100a la donnée transport utilisée dans la modélisation des planches de bois (transport final) pour 1 t.km « Transport, freight, sea, container ship {GLO}| transport, freight, sea, container ship » : l'impact est de 9,36E-03 kg CO_2 eq./tkm donc 7% de cet impact représente 6,55E-04 kg CO_2 eq. Ce flux est ensuite divisé par le facteur de caractérisation du BC, 846, ce qui donne **le flux d'émission du BC à ajouter pour 1 tkm : 7,74E-07 kg CO_2 eq**.

L'ajout manuel de ce flux dans tous les inventaires de transport maritime d'arrière-plan serait très long et source d'oubli, le BC n'est donc ajouté qu'au transport maritime final et la méthode suivante est appliquée pour considérer l'impact du BC émis par les autres étapes de transports :
- au niveau du cycle de vie, il y a un total de 4,73 kt.km soit 4 730 tkm de ce transport pour un impact total sans NTCF de ce transport maritime de 37,64 kg CO2 eq.
- pour 1 tkm de ce transport avec prise en compte des NTCF, BC inclus, l'impact du BC est de 6,54E-04 kg CO_2 eq. donc **pour 4 730 tkm : 3,1 kg CO_2 eq au total**.
- ces 3,1 kg CO2 eq. incluent le transport final qui représente 994 tkm soit 21% du transport maritime total. **L'impact du BC inclus dans les autres étapes de transport maritime est donc de 2,44 kg CO_2 eq.** (3,10 x (1-0,21))

La combustion de biomasse génère également des émissions de black carbon, et d'organic carbon. On considère que la proportion de particules fines 10µm étant du black carbon est de 4,3%, et 17% de l'organic carbon[14].
L'inventaire des émissions dans l'air de la donnée incinération utilisée pour modéliser cette part de fin de vie des planches de bois « Waste wood, untreated {CH}| treatment of, municipal incineration | Cut-off, U » ne contient pas d'émission de particules fines. Pour cet analyse de sensibilité, elle est donc remplacée par la donnée « Waste building wood, chrome preserved {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction » dont l'inventaire indique, par kg de bois incinéré :
- 4,0449E-6 kg de particules de diamètre < 2,5µm
- et 2,0326E-8 kg de particules de diamètre compris entre 2,5µm et 10µm
soit un total de 4,07E-6 kg de particules fines.
On considère donc 4,3% de ce total comme étant du BC, soit 1,75E-07 kg, et 17% de l'OC soit 6,91E-07 kg. Ces deux flux sont ajoutés à la donnée, et le flux de PM2.5 est adapté pour ne pas avoir de double comptage en le passant de 4,04E-06 kg à 3,18E-06 kg (on lui soustrait les quantités des deux NTCF ajoutés ; cette soustraction n'est faite que sur la quantité de PM2,5 qui est beaucoup plus importante que celle des particules > 2,5 µm et < 10 µm).

La méthode IPCC 2013 GWP 100a est aussi adaptée en ajoutant les flux et les facteurs de caractérisation suivants :

[13] https://ccacoalition.org/en/blog/black-carbon-and-maritime-shipping-long-road-regulating-short-lived-climate-pollutant
[14] Arvesen, A., Cherubini, F., del Alamo Serrano, G. *et al.* Cooling aerosols and changes in albedo counteract warming from CO_2 and black carbon from forest bioenergy in Norway. *Sci Rep* **8,** 3299 (2018). https://doi.org/10.1038/s41598-018-21559-8

Formule de la substance d'après UNEP/SETAC	Nom du flux caractérisé correspondant	Facteur de caractérisation associé
CO	Carbon monoxide, fossil	2,1
NOx	Nitrogen oxides	-29
NMVOC	Non-methane volatile organic compouds, unspecified origin	5,5
SOx	Sulfur dioxide	-38
OC	pas d'ajout (pas caractérisé ni d'information trouvée sur l'émission d'organic carbon)	(- 43) nc
BC	Black carbon	846

9.1.1.3.2 Résultats

Résultats sur le cycle de vie complet de la maison (bois, chauffage et fin de vie avec la donnée incinération adaptée pour cette analyse de sensibilité) :

	Sans NTCF	Avec NTCF	Différence
Impact total (kg CO_2 eq.)	63 904	53 984	-15,5%

→ En prenant en compte les NTCF, l'impact sur le GWP diminue de 15,5% par rapport au résultat sans prendre en compte les NTCF.
→ Sur l'impact total de 53 984 kg CO_2 eq., les 3,1 kg CO_2 eq. représentés par le BC sont donc totalement insignifiants (0,006%).
Comme le montre le tableau ci-dessous, ce sont bien les oxides nitreux et le dioxyde de sulfure qui sont les NTCF les plus importants à prendre en compte, ayant un impact manifeste sur le résultat du GWP malgré leurs faibles quantités émises.

Les substances surlignées en jaune dans le tableau ci-dessous sont celles ayant été spécifiquement rajoutées à la méthode (ainsi qu'à l'inventaire pour le black carbon et l'organic carbon) :

	Sans NTCF			Avec NTCF		
	Contribution au GWP en kg CO_2 eq.	en % par rapport à l'impact total	Quantité émise dans l'air en kg	Contribution au GWP en kg CO_2 eq.	en % par rapport à l'impact total	Quantité émise dans l'air en kg
Carbon dioxide, fossil	55 665	87,11 %	55 665	55 665	103,11 %	55 665
Methane, fossil	3 406	5,33 %	112	3 406	6,31 %	112
Methane, biogenic	1 801	2,82 %	65	1 801	3,34 %	65
Dinitrogen monoxide	1 494	2,34 %	6	1 494	2,77 %	6
Sulfur hexafluoride	908	1,42 %	0,04	908	1,68 %	0,04
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	491	0,77 %	0,06	491	0,91 %	0,06
Carbon monoxide, fossil	*> 0,01% de l'impact total*		85	179	0,33 %	85
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	*> 0,01% de l'impact total*		26	143	0,27 %	26
Carbon dioxide, land transformation	88	0,14 %	88	88	0,16 %	88
Methane, tetrafluoro-, CFC-14	29	0,05 %	0,004	29	0,05 %	0,004
Ethane, hexafluoro-, HFC-116	9	0,01 %	0,001	9	0,02 %	0,001
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	7	0,01 %	0,004	7	0,01 %	0,004

Nitrogen oxides	*> 0,01% de l'impact total*		133	-3 864	-7,16 %	133
Sulfur dioxide	*> 0,01% de l'impact total*		168	-6 379	-11,82 %	168
Flux restants	*9*	*0,01 %*		*10*	*0,02 %*	

Les 2 substances oxides nitreux et dioxyde de sulfure contribuent à elles deux à près de -19% de l'impact total, alors qu'elles représentent une infime proportion de la part massique des émissions les plus contributrices à l'impact (seuil toujours fixé à 99,98%). Ce sont ces deux NTCF qui participent majoritairement à la différence d'impact liée à la prise en compte des NTCF. Par ailleurs, malgré son important facteur de caractérisation, le black carbon ne ressort pas ; l'organic carbon ne ressort pas non plus.

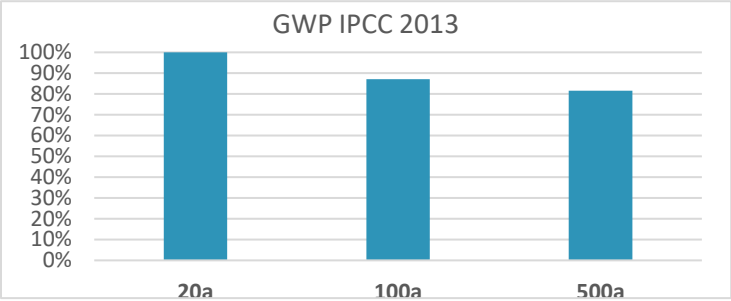
9.1.1.4 Prise en compte de l'horizon temporel

9.1.1.4.1 Méthode d'intégration à l'ACV

On compare ici les résultats calculés par les méthodes : IPCC 2013 GWP 20a versus IPCC 2013 GWP 100a versus IPCC 2013 GWP 500a.

9.1.1.4.2 Résultats

	20a	100a	500a
IPCC 2013 GWP (kg CO_2 eq.)	73 491	64 058	59 959



La différence d'impact est de :
- 13% entre l'horizon 20a et l'horizon 100a et de 18% entre l'horizon 20a et l'horizon 500a
- et de 6% entre l'horizon 100a et l'horizon 500a

Ces différences s'expliquent par les points suivants :

Contribution par substance :

	Impact GWP en % par rapport à l'impact total		
	IPCC 20a	**IPCC 100a**	**IPCC 500a**
Carbon dioxide, fossil	75,98 %	87,17 %	93,13 %
Methane, fossil	13,01 %	5,33 %	2,01 %
Methane, biogenic	7,29 %	2,81 %	0,86 %
Dinitrogen monoxide	2,01 %	2,31 %	1,22 %
Sulfur hexafluoride	0,92 %	1,42 %	2,03 %
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	0,60 %	0,77 %	0,53 %
Carbon dioxide, land transformation	0,09 %	0,11 %	0,11 %
Methane, tetrafluoro-, CFC-14	0,03 %	0,05 %	0,07 %
Ethane, hexafluoro-, HFC-116	0,01 %	0,01 %	0,02 %

Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	0,03 %	0,01 %	*> 0,01% de l'impact total*
Flux restants	*0,03 %*	*0,01 %*	*0,01 %*

Facteurs de caractérisation de 4 substances contribuant le plus aux impacts, hors CO_2 :

	20 ans	100 ans	500 ans
Méthane fossile	82,65	30,5	10,75
Méthane biogénique	85,4	27,75	8
Oxyde nitreux	264	265	131
Hexafluorure de soufre	17 500	23 500	31 510

La différence d'impact est de :
- 13% entre l'horizon 20a et l'horizon 100a et de 18% entre l'horizon 20a et l'horizon 500a, expliquée donc majoritairement par les émissions de méthane (fossile et biogénique).
- et de 6% entre l'horizon 100a et l'horizon 500a, la différence étant principalement due au flux d'oxyde nitreux dont le facteur de caractérisation est moins important à 500 ans (et compensant le facteur de caractérisation plus important de l'hexafluorure de soufre).

9.1.2 Considération statique : comparaison entre GWP et GTP

9.1.2.1 Méthode d'intégration à l'ACV

Le tableau annexe 8.1.A du rapport du GIEC 2013, chapitre 8[15], donne accès aux valeurs du GTP 100a. La méthode est donc reconstruite, en partant des noms des éléments de la méthode GWP 100a, pour calculer les résultats sur le GTP. Sur les 212 flux caractérisés par un GWP, 51 ne le sont pas par un GTP (équivalents non trouvés dans la liste des flux de GWP 100a ou doublons en termes de nom).
On compare le résultat d'impact de notre cas d'étude en cycle de vie avec les indicateurs GWP et GTP.

9.1.2.2 Cas du mix prospectif comme base de comparaison des résultats GTP vs GWP.

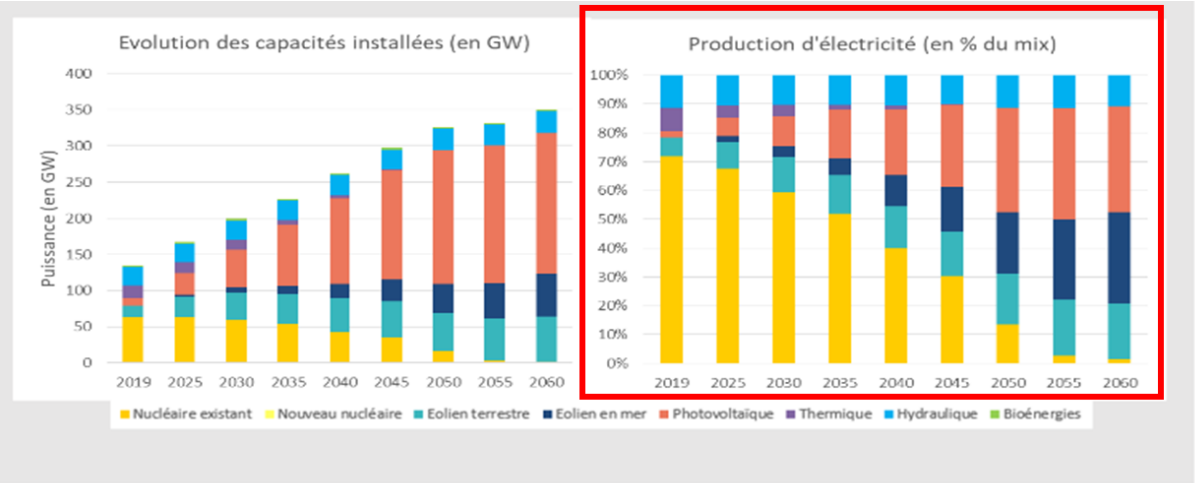
L'intérêt de la comparaison entre GWP et GTP réside moins dans les valeurs absolues obtenues que dans la comparaison des conclusions obtenues lors de l'usage de l'un ou l'autre des indicateurs en ACV comparative.
Aussi, le cas d'étude de la comparaison entre une ACV basée sur un mix actuel et une ACV basée sur un mix électrique prospectif en phase d'usage du bâtiment semble ici opportun.
On compare à présent la différence d'impact entre 2 scénarios sur GWP, et sur GTP. Pour ce faire, on modélise la phase d'utilisation de la maison en intégrant un mix électrique évolutif au fil des ans.

Le rapport 2021 RTE "*Bilan prévisionnel long terme « Futurs énergétiques 2050 » - Consultation publique sur le cadrage et hypothèses des scénarios*"[16] présente différents scénarii d'évolution du mix électrique français, permettant ainsi de créer des mix électriques français prospectifs simplifiés échelonnés tous les 5 ans de 2025 à 2060 pour pouvoir comparer l'approche statique et l'approche dynamique sur la base du présent cas d'étude.

[15] Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
[16] https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/Bilan%20Previsionnel%202050-consultation-complet.pdf

N.B. : Le choix du scénario RTE est donc arbitraire et le mix prospectif modélisé n'est qu'illustratif, avec pour seul objectif d'analyser dans quelle mesure l'intégration d'un mix prospectif influe sur les résultats.

Le scénario M1 « Répartition diffuse des énergies renouvelables sur le territoire » est choisi pour le présent cas d'étude.



La lecture du graphique ci-dessus, partie droite, permet de construire les mix électriques suivants :

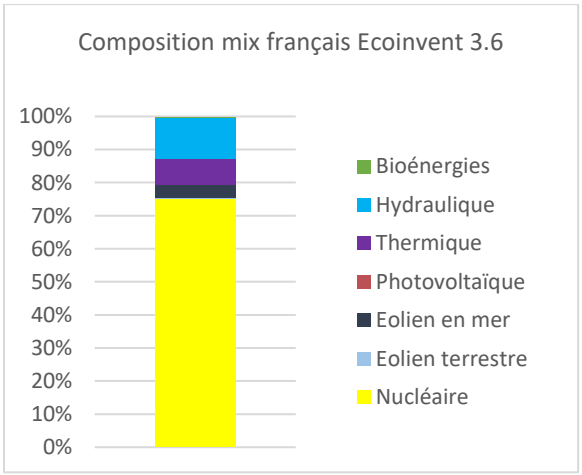
	Nucléaire	Eolien terrestre	Eolien en mer	Photovoltaïque	Thermique	Hydraulique	Bioénergies
2025	68%	10%	2%	6%	3%	11%	0%
2030	60%	12%	3%	11%	3%	11%	0%
2035	51%	13%	5%	19%	1%	11%	0%
2040	41%	14%	10%	23%	1%	11%	0%
2045	31%	16%	13%	29%	0%	11%	0%
2050	13%	17%	21%	37%	0%	12%	0%
2055	2%	19%	28%	39%	0%	12%	0%
2060	1%	18%	30%	39%	0%	12%	0%

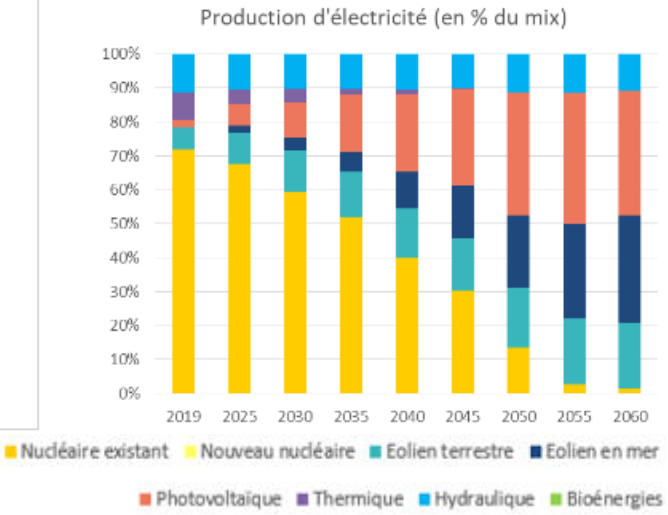
Le tableau ci-dessous indique les données génériques pour modéliser les différentes sources d'électricité :

	Données Ecoinvent pour modéliser les mix prospectifs simplifiés	**Commentaire**
Nucléaire	Electricity, high voltage {FR}| electricity production, nuclear, pressure water reactor	
Eolien terrestre	Electricity, high voltage {FR}| electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore	1-3 impact moyen par rapport au <1 et >3MW
Eolien en mer	Electricity, high voltage {FR}| electricity production, wind, 1-3MW turbine, offshore	
Photovoltaïque	Electricity, high voltage {ES}| electricity production, solar thermal parabolic trough, 50 MW	Pas de donnée high voltage FR --> proxy Espagne
Thermique	50% Electricity, high voltage {FR}| electricity production, oil	Hypothèse pour le thermique : 50% charbon et 50% pétrole (trop de données gaz)

	50% Electricity, high voltage {FR}| electricity production, hard coal	
Hydraulique	8% Electricity, high voltage {FR}| electricity production, hydro, pumped storage	Recalcul de la proportion de chacun des trois types hydrauliques selon la donnée Ecoinvent initiale "Electricity, high voltage {FR}| market for"
	15% Electricity, high voltage {FR}| electricity production, hydro, reservoir, alpine region	
	78% Electricity, high voltage {FR}| electricity production, hydro, run-of-river | Cut-off, U	
Bioénergies	nc	

On compare donc ici la différence d'impact entre :
- le recours à un seul mix électrique pour les 41 ans de la phase d'usage (scénario de base avec mix français Ecoinvent 3.6) :





- à l'intégration de mix prospectifs en modélisant les 41 années de chauffage par cinq ans avec le mix 2025, cinq ans avec le mix 2030, cinq ans avec le mix 2035, cinq ans avec le mix 2040, cinq ans avec le mix 2045, cinq ans avec le mix 2050, cinq ans avec le mix 2055 et les six dernières années avec le mix 2060.

… ces deux mix étant grandement différents.

9.1.2.2.1 Résultats : comparaison des valeurs absolues

	IPCC GWP 100a (kg CO_2 eq.)		IPCC GTP 100a (kg CO_2 eq.)
TOTAL (kg CO2 eq.)	64 058		59 710
Différence		6,8%	

→ Le GTP est 6,8% plus faible que le GWP. Dans les deux cas, les deux émissions les plus contributrices sont celles de CO_2 fossile, mais la différence est expliquée par la variation des facteurs de caractérisation du méthane fossile et biogénique environ 5 fois plus faible pour le GTP (dû au fait que l'indicateur GTP est sur une approche long terme à la différence du GWP plus court terme). Les 2 autres

substances les plus contributrices au GTP ne sont donc plus de ce fait le méthane fossile et biogénique mais le N_2O (malgré son facteur de caractérisation plus faible mais dans une proportion moins grande que la diminution de la valeur des facteurs de caratérisation du méthane), et l'hexafluorure de soufre (dont le facteur de caractérisation est plus grand pour le GTP).

Contribution à l'impact des émissions dans l'air par substance :

	GWP		GTP	
	Contribution de la substance	Facteur de caractérisation	Contribution de la substance	Facteur de caractérisation
Carbon dioxide, fossil	87,17 %	1	93,52 %	1
Methane, fossil	5,33 %	30,5	1,12 %	6
Methane, biogenic	2,81 %	27,75	0,43 %	4
Dinitrogen monoxide	2,31 %	265	**2,19 %**	234
Sulfur hexafluoride	1,42 %	23 500	**1,83 %**	**28 200**
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	0,77 %	8 590	0,82 %	**8 550**
Carbon dioxide, land transformation	0,11 %	1	*> 0,01% de l'impact total*	1
Methane, tetrafluoro-, CFC-14	0,05 %	6 630	0,06 %	8 040
Ethane, hexafluoro-, HFC-116	0,01 %	11 100	0,02 %	13 500
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	0,01 %	1 760	*> 0,01% de l'impact total*	262
Flux restants	*0,01 %*		*0,01 %*	

9.1.2.2.2 Résultats : influence sur les conclusions comparatives

	100% mix français EI 3.6	Mix évolutif	Différence
GWP 100a (kg CO_2 eq.)	64 058	31 196	51,3%
GTP 100a (kg CO_2 eq.)	59 710	28 396	52,4 %

La différence d'impact entre deux scénarii est quasiment identique avec les deux indicateurs, et dans le même sens : le scénario mix évolutif est moins impactant avec GTP.

9.1.3 Comparaison entre statique et dynamique

9.1.3.1 De l'inventaire seul : impact du recours au mix prospectif

9.1.3.1.1 Méthode d'intégration à l'ACV

La méthode a été décrite en 9.1.2.2.

9.1.3.1.2 Résultats

Ces résultats ont été obtenus précédemment au paragraphe 0.

9.1.3.2 De l'inventaire et de la caractérisation via la mise en œuvre du GWP dynamique

Pour ce faire, on utilise l'outil DYNCO2 v2.0 qui s'appuie sur le 5ème rapport d'évaluation de l'IPCC[17].

9.1.3.2.1 Mix prospectif : méthode d'intégration à l'ACV

L'analyse de l'impact de la consommation électrique annuelle (15 600 kWh) avec chaque mix électrique prospectif (méthode IPCC 2013 GWP 100a) permet d'obtenir les substances les plus contributrices ainsi que leur quantité émise (cut-off à 0,01% : seules les substances contribuant à plus de 0,01% de l'impact). On utilise l'outil DYNCO2 pour modéliser chaque année d'utilisation en rentrant ces quantités durant 41 ans, de l'année 46 à l'année 86 incluse.

On analyse ici uniquement l'étape d'usage du bâtiment i.e. l'impact de la consommation électrique pour le chauffage. Chaque mix prospectif est analysé sur une consommation annuelle (15 600 kWh / an) avec SimaPro afin d'obtenir les émissions dans l'air générées, présentées dans le tableau ci-après.

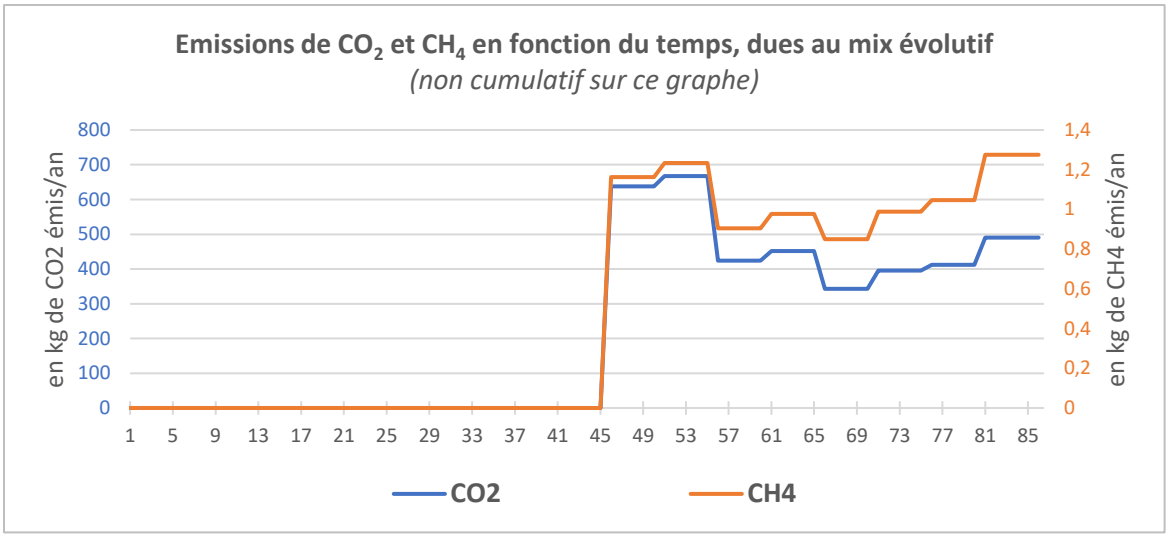
Ces émissions incluent celles d'arrière-plan (entre autres les émissions liées à la fabrication des infrastructures, ou à l'extraction / production de certaines matières premières qui peuvent avoir été générées bien avant l'utilisation de l'énergie qui est issue de leur utilisation). Avec cette approche, on rend donc indirectement dynamiques des éléments qui ne le sont pas (seules les émissions liées à la production de l'électricité devraient être rentrées dans DYNCO2). Ceci est une limite de la modélisation dans SimaPro avec des données Ecoinvent, et ce même en utilisant la fonction excluant les infrastructures, l'inventaire contenant toujours d'autres émissions non directement liées à la génération d'électricité à l'instant t.

[17] https://ciraig.org/index.php/project/dynco2-dynamic-carbon-footprinter/

Substances les plus contributrices à l'impact des différents mix électriques haute tension, et quantité émise (en kg) par an (soit pour 15 600 kWh)

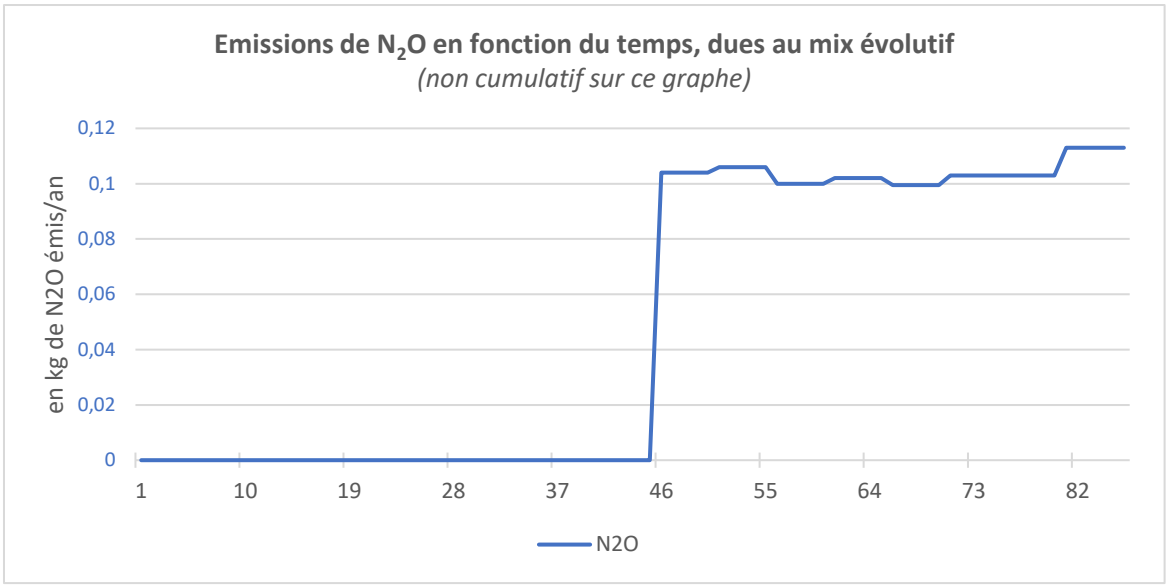
	Mix 2025	Mix 2030	Mix 2035	Mix 2040	Mix 2045	Mix 2050	Mix 2055	Mix 2060
Carbon dioxide, fossil	6,37E+02	6,67E+02	4,24E+02	4,51E+02	3,43E+02	3,95E+02	4,12E+02	4,90E+02
Methane, fossil	1,14E+00	1,21E+00	8,82E-01	9,54E-01	8,26E-01	9,62E-01	1,02E+00	1,24E+00
Dinitrogen monoxide	1,04E-01	1,06E-01	1,00E-01	1,02E-01	9,95E-02	1,03E-01	1,03E-01	1,13E-01
Sulfur hexafluoride	1,01E-05	1,08E-05	1,11E-05	1,17E-05	1,22E-05	1,33E-05	1,39E-05	9,40E-04
Methane, biogenic	2,23E-02	2,31E-02	2,35E-02	2,41E-02	2,47E-02	2,65E-02	2,68E-02	3,53E-02
Methane, tetrafluoro-, CFC-14	3,06E-05	3,25E-05	3,46E-05	3,61E-05	3,80E-05	4,09E-05	4,20E-05	1,16E-04
Carbon dioxide, land transformation	4,33E-01	4,31E-01	4,17E-01	4,07E-01	3,93E-01	3,77E-01	3,57E-01	4,78E-01
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	1,20E-03	1,06E-03	9,05E-04	7,31E-04	5,57E-04	2,46E-04	5,46E-05	3,94E-05
Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	nc	nc	6,55E-04	7,91E-04	9,94E-04	1,27E-03	1,33E-03	1,74E-03
Ethane, hexafluoro-, HFC-116	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	1,99E-05
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	nc	nc	2,95E-05	3,42E-05	3,99E-05	4,85E-05	5,25E-05	6,30E-05

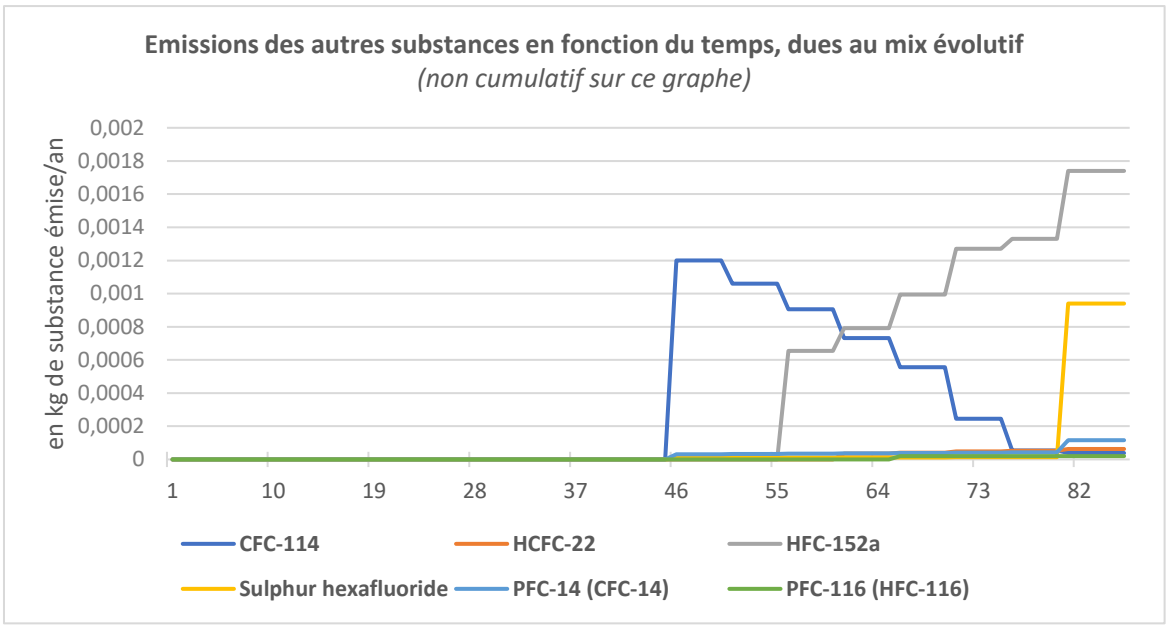
Ces émissions sont ensuite rentrées dans DYNCO2 : le mix 2025 est utilisé de 2025 à 2029, ses émissions annuelles sont donc inventoriées pour ces 5 années et ainsi de suite pour :
- le mix 2025 utilisé les 5 premières années : année 46 à 50
- le mix 2030 utilisé de l'année 51 à 55
- le mix 2035 utilisé de l'année 56 à 60
- le mix 2040 utilisé de l'année 61 à 65
- le mix 2045 de l'année 66 à 70
- le mix 2050 de l'année 71 à 75
- le mix 2055 de l'année 76 à 80
- et le mix 2060 utilisé pendant 6 ans de l'année 81 à 86 (phase totale d'utilisation de 41 ans).



Pour rappel, les émissions de CO_2 sont uniquement fossiles, IPCC 2013 GWP ne caractérisant pas le carbone biogénique. Il n'y a pas d'émissions avant l'année 41, à laquelle la phase d'utilisation démarre avec le 1er mix prospectif. Les émissions carbonées sont prépondérantes avec l'utilisation des 2 premiers mix dans lesquels l'électricité produite à partir de pétrole et gaz est encore présente (uniquement à 3% chacune mais étant les plus contributrices au GWP), puis le fort développement du photovoltaïque, et de l'éolien, permet de diminuer les émissions de CO_2 et CH_4.

	1er contributeur sur GWP	2ème contributeur sur GWP
Mix 2025	Electricité par charbon (énergie dite thermique) : 27%	Electricité par pétrole (énergie thermique) : 24%
Mix 2030	Electricité par charbon : 26%	Electricité par pétrole : 23%
Mix 2035	Electricité par charbon : 13%	Chaleur par gaz : 13% (utilisée pour la combustion d'appoint pour l'élec. produite par le photovoltaïque)
Mix 2040	Chaleur par gaz : 14% (utilisée pour la combustion d'appoint pour l'élec. produite par le photovoltaïque)	Electricité par charbon : 12%
Mix 2045	Chaleur par gaz : 21% (utilisée pour la combustion d'appoint pour l'élec. produite par le photovoltaïque)	Production de fonte : 5% (pour la production d'acier pour les infrastructures photovoltaïques et éoliennes)
Mix 2050	Chaleur par gaz : 25% (utilisée pour la combustion d'appoint pour l'élec. produite par le photovoltaïque)	Production de fonte : 5% (pour la production d'acier pour les infrastructures photovoltaïques et éoliennes)
Mix 2055	Chaleur par gaz : 25% (utilisée pour la combustion d'appoint pour l'élec. produite par le photovoltaïque)	Production de fonte : 6% (pour la production d'acier pour les infrastructures photovoltaïques et éoliennes)
Mix 2060	Chaleur par gaz : 25% (utilisée pour la combustion d'appoint pour l'élec. produite par le photovoltaïque)	Production de fonte : 6% (pour la production d'acier pour les infrastructures photovoltaïques et éoliennes)



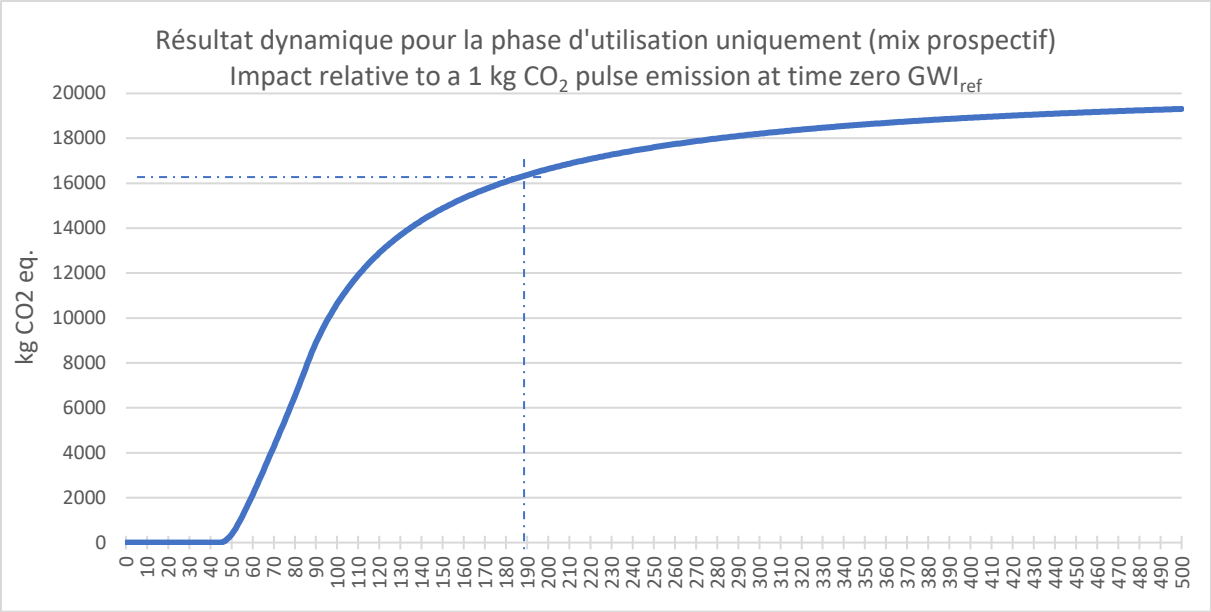


9.1.3.2.2 Mix Prospectif : résultats

En statique, l'impact des 41 années de chauffage avec le mix évolutif basse tension était de 26 331 kg CO_2 eq.

En **haute tension**, le résultat est de **21 765 kg CO_2 eq.**, haute tension sur laquelle on se base pour la comparaison avec le dynamique.

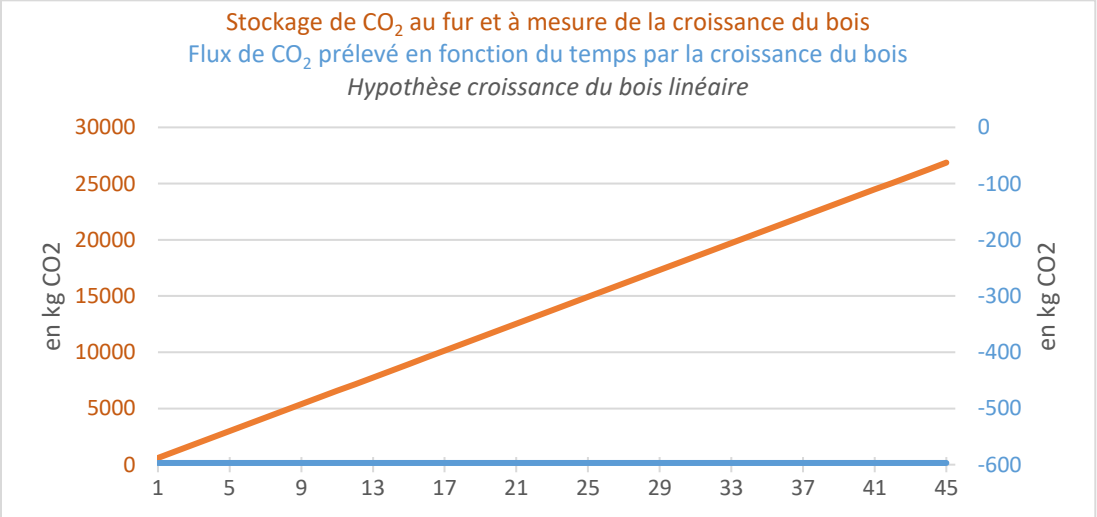
En dynamique, l'impact atteint au bout de 100 ans i.e. à l'année 187 (100 ans après la dernière émission) l'impact est de **16 039 kg CO_2 eq.** (cf. graphe ci-dessous). A noter que le palier des 20 000 kg CO_2 eq. n'est toujours pas atteint au bout de la 2 000ème année (limite de l'outil DYNCO2). Au bout de 2 000 ans, l'impact est de 19 814 kg CO_2 eq. Il faudrait donc un temps extrêmement long pour atteindre l'impact de l'approche statique (21 765 kg CO_2 eq.).



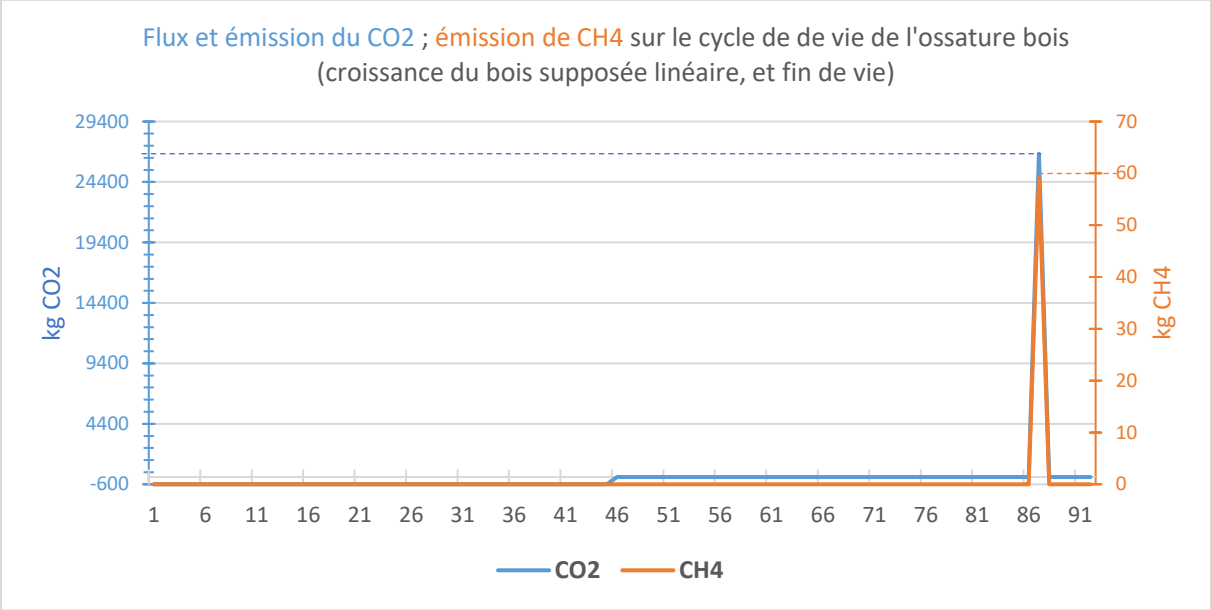
N.B. : les calculs de l'outil DYNCO2 sont réalisés sur le forçage radiatif des substances ; l'expression en kg CO2 eq. se fait en divisant le résultat du forçage radiatif de l'année considérée par le résultat du forçage radiatif de l'année considérée du CO_2 émis la première année. Les graphiques représentent donc l'impact relatif total par rapport à l'impact dynamique du CO_2 émis à t_0.

9.1.3.2.3 Cycle de vie du bois : méthode d'intégration à l'ACV selon le scénario 15804+A1 : réutilisation du bois non considérée mais modélisée par une émission de CO_2 biogénique la même année que l'incinération et l'enfouissement

La totalité du bois utilisé pour l'ossature de la maison de 130 m² contient 7 322 kg de carbone équivalent à 26 846 kg de CO_2. On fait l'hypothèse que la croissance de la forêt a lieu sur 45 ans, avec un prélèvement de carbone constant chaque année soit en équivalent CO_2 : 26 846 / 45 = 597 kg CO_2 eq. prélevés par an. Le graphe ci-dessous représente la courbe du CO_2 stocké en cumul dans le bois au fil du temps, et le flux de CO_2 prélevé par an (non cumulatif → droite étant donnée l'hypothèse d'un prélèvement constant).



A la 46ème année, le bois est coupé pour bâtir la maison, cette dernière ayant une durée de vie de 41 ans i.e. de l'année 46 à l'année 86. La maison est démantelée à l'année 87, année au cours de laquelle le bois subira les traitements de fin de vie.



N.B. : l'émission de N_2O prise en compte ci-dessous n'est pas représentée dans le graphe de flux ci-dessus (trop faible).

Afin de faire la comparaison entre l'approche statique et l'approche dynamique sur le cycle de vie du bois (phase d'utilisation exclue : prise en compte uniquement de la croissance de la forêt et de la fin de vie du bois), il convient tout d'abord de s'assurer **d'un périmètre identique pour les deux approches** :

- dans DYNCO2, le prélèvement de CO_2 est rentré dans l'inventaire, chaque année durant les 45 premières années ;

- dans SimaPro, ce sont les données Ecoinvent qui servent de base : les données Ecoinvent matériaux issus du bois sont souvent des coproduits d'un processus amont : c'est le cas des données sur les planches utilisées dans la modélisation pour les analyses statiques précédentes ; ces coproduits sont modélisés par des processus indépendants les uns des autres, chaque inventaire étant réalisé en intégrant l'allocation choisie dans les quantités des différents processus, flux entrants et flux sortants de la nature. **L'allocation pour les coproduits issus de l'activité scierie est économique, et est donc appliquée à l'ensemble de l'inventaire de planches de bois, affectant ainsi en arrière-plan la quantité de carbone prélevé dans l'air par le bois brut en amont**.
En faisant l'analyse avec une méthode ne caractérisant pas le carbone prélevé dans l'air, comme c'est le cas pour IPCC GWP 2013, cela n'affecte pas le résultat ; mais dans le cas où l'on souhaite avoir une approche non pas dite « 0 : 0 » (i.e. ne caractérisant pas les flux de carbone prélevé ni les flux d'émissions incluant du carbone biogénique) mais « -1 : +1 » (i.e. faisant cette caractérisation), ce qui est le cas **pour pouvoir se comparer à l'approche dynamique, alors l'utilisation des données coproduits Ecoinvent biaise le résultat, le prélèvement dans l'air étant affecté par l'allocation économique.**

Il faut donc calculer les réelles quantités de carbone prélevées par le bois, ainsi que les quantités émises selon les différentes voies de fin de vie.

Calcul du contenu en carbone du bois et des quantités émises sous forme de CO_2 en fin de vie :

En considérant que le bois contient 50% de carbone, **le flux de carbone prélevé de l'air par la totalité du bois constitutif de la maison** (14 643 kg de bois) est de 7 322 kg de carbone (14 643 * 0,5) soit **26 846 kg de CO_2 eq.** (7 322 * (44/12)).

Le flux de CO_2 biogénique émis dans l'air en fin de vie est donc de :
- par les 25,5% incinérés : 6 846 kg CO_2
- par les 17,3% enfouis, dont seuls 15% se dégradent : 697 kg CO_2.

et il y a donc un stockage de :
- 3 948 kg CO_2 stockés par l'enfouissement
- et 15 356 kg CO_2 restant dans la partie rachetée et réutilisée.

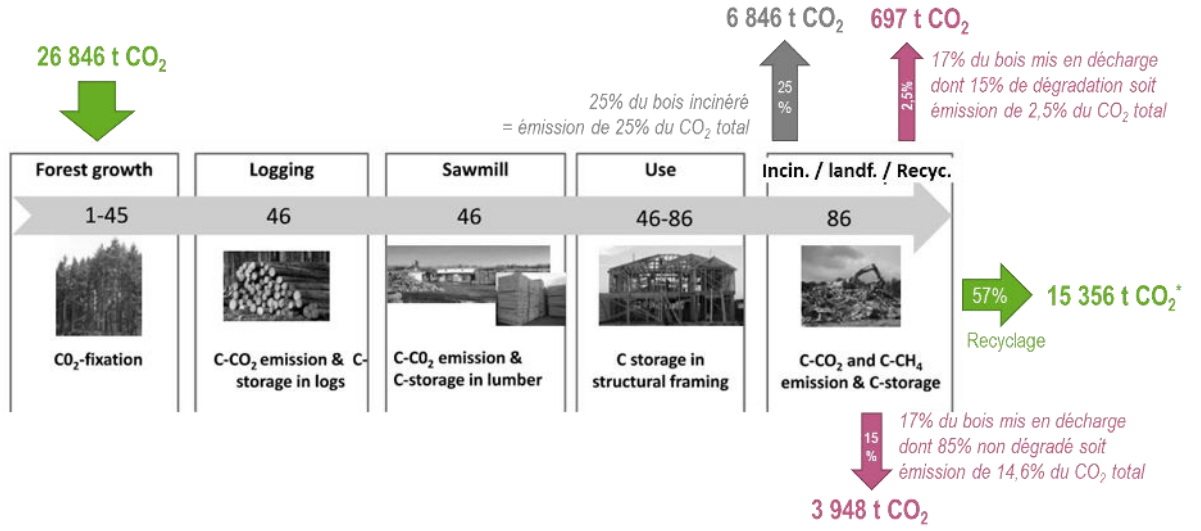


Figure 20 : Bilan des flux de CO_2 liés au cycle de vie du bois.

N.B. : une partie du carbone est émis sous forme de méthane lors de l'incinération et de la dégradation du bois enfoui (et non pas 100% sous forme de CO_2). Cependant cette répartition entre ces deux types d'émissions est difficilement quantifiable, et ne peut être trouvée de manière exacte en utilisant SimaPro et les données Ecoinvent, ces dernières incluant nécessairement les données d'arrière-plan. Le flux de carbone biogénique émis sous forme de méthane n'est donc pas représenté sur le schéma ci-dessus, mais est très faible comparé au flux émis sous forme de CO_2.

Adaptation des données Ecoinvent :

Pour pallier la limite de la base de données Ecoinvent incluant les allocations dans les inventaires, et pouvoir mener la comparaison statique *versus* dynamique, un flux négatif de -26 846 kg CO_2 fossile correspondant à l'équivalent du carbone prélevé par le bois est ajouté à la modélisation, de sorte que le prélèvement exact soit pris en compte par la méthode IPCC 2013 GWP (qui ne caractérise pas le flux de CO_2 biogénique). Les émissions biogéniques dues à la fin de vie du bois sont converties en émissions fossiles afin d'être également caractérisées par la méthode IPCC 2013 GWP.

L'inventaire des émissions des 4 substances les plus contributrices lors de la fin de vie peut alors être extrait en utilisant la modélisation ainsi adaptée dans SimaPro, et rentré dans DYNCO2 à la 87ème année (dans un premier temps, on fait l'hypothèse que tout le carbone est réémis lors de 87ème année, i.e. en

modélisant le recyclage par une émission de carbone comme dans la partie statique, conformément à l'EN 15804).
L'inventaire des émissions de CO_2 obtenu via SimaPro indique les quantités émises suivantes, que l'on rentre dans l'inventaire DYNCO2 (sauf les 0,02 kg rassemblant les flux restants) :

	Quantité émise dans l'air	Contribution à l'impact dû à la fin de vie du bois	Quantité prélevée lors de la croissance du bois
Carbon dioxide, fossil*	26 729 kg	94,24 %	- 26 846 kg
Methane, biogenic	59 kg	5,73 %	nc
Methane, fossil	0,09 kg	0,01 %	nc
Dinitrogen monoxide	0,019 kg	0,02 %	nc
Flux restants émis par la fin de vie	0,02 kg	< 0,001%	nc

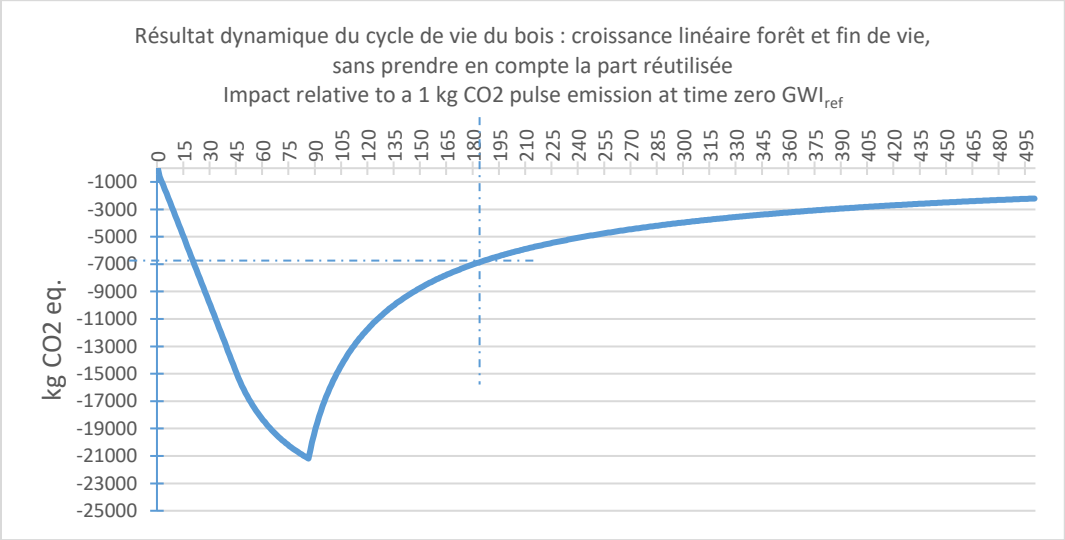
** incluant donc les émissions biogéniques, ceci étant dû à l'adaptation de la modélisation décrite ci-dessus*

Les 59 kg de méthane biogénique émis correspondent à 44 kg de carbone soit en équivalent CO_2 : 161 kg CO2 éq. .

N.B. : la quantité de CO_2 issue du bois émise en fin de vie est ici de 26 729 kg (et non 22 899 kg, somme des émissions de CO_2 directes liées à la fin de vie du bois calculé en Figure 20*). Ceci est lié aux émissions des processus de fin de vie d'arrière-plan (données Ecoinvent utilisées incluant les infrastructures par exemple).*

9.1.3.2.4 Cycle de vie du bois : Résultats (méthode EN 15804)

En statique (méthode IPCC 2013 GWP 100a), l'impact est de **4 703 kg CO_2 eq.**, positif et non nul dû au fait qu'une partie du carbone est réémis sous forme de méthane.
En dynamique, si l'on se place à 100 ans après la dernière émission ayant eu lieu à l'année 86, donc à l'année 186, on constate que l'impact est encore très négatif : - 6 710 CO_2 eq. En effet le pic d'émission à l'année 86 n'est intégré que sur 100 ans, tandis que la captation de la 1ère année est intégrée sur 185 ans, celle de la 2ème année sur 184 ans etc. L'équilibre ne serait atteint qu'au bout de plusieurs milliers d'années. Si l'on pouvait prendre en compte tous les gaz à effet de serre de tout l'arrière-plan en dynamique, on devrait à terme arriver au même résultat qu'en statique (4073 kg CO_2 eq.).



9.1.3.2.4.1 Analyse de sensibilité : dynamique de prélèvement de carbone en phase de croissance. Méthode d'intégration à l'ACV

En considérant cette fois-ci non pas un prélèvement linéaire de carbone par la forêt durant les 45 années mais en s'appuyant sur l'équation du taux de croissance de la végétation[18] selon le temps et la période de rotation (hypothèse de 45 ans ici), on constate que la croissance et donc le prélèvement de carbone suit la dynamique suivante :

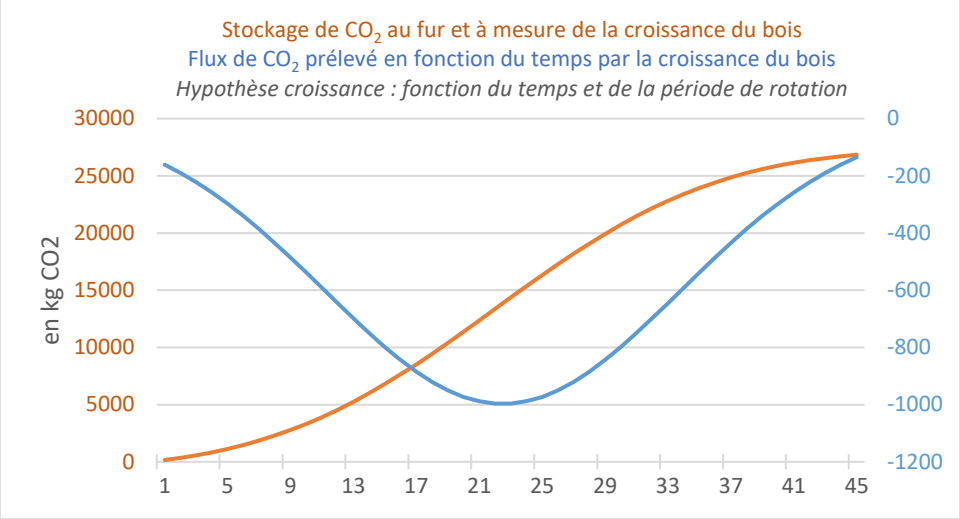
$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2}$$

avec t l'année ; μ = rotation / 2 ; σ = μ / 2

Année	Résultat de l'équation	En taux de croissance	Rapporté aux 26 846 kg CO_2 prélevés
1	0,00571	1%	161 kg
2	0,00674	1%	190 kg
3	0,00790	1%	222 kg
4	0,00918	1%	258 kg
5	0,01058	1%	297 kg
6	0,01210	1%	340 kg
7	0,01373	1%	386 kg
8	0,01546	2%	435 kg
9	0,01727	2%	486 kg
10	0,01913	2%	538 kg
11	0,02104	2%	592 kg
12	0,02295	2%	645 kg
13	0,02483	3%	698 kg
14	0,02666	3%	750 kg
15	0,02840	3%	799 kg
16	0,03002	3%	844 kg
17	0,03148	3%	885 kg
18	0,03274	3%	921 kg
19	0,03379	4%	950 kg
20	0,03461	4%	973 kg
21	0,03516	4%	989 kg
22	0,03544	4%	997 kg
23	0,03544	4%	997 kg
24	0,03516	4%	989 kg
25	0,03461	4%	973 kg
26	0,03379	4%	950 kg
27	0,03274	3%	921 kg
28	0,03148	3%	885 kg
29	0,03002	3%	844 kg
30	0,02840	3%	799 kg
31	0,02666	3%	750 kg
32	0,02483	3%	698 kg
33	0,02295	2%	645 kg
34	0,02104	2%	592 kg
35	0,01913	2%	538 kg
36	0,01727	2%	486 kg
37	0,01546	2%	435 kg
38	0,01373	1%	386 kg
39	0,01210	1%	340 kg
40	0,01058	1%	297 kg
41	0,00918	1%	258 kg
42	0,00790	1%	222 kg
43	0,00674	1%	190 kg
44	0,00571	1%	161 kg

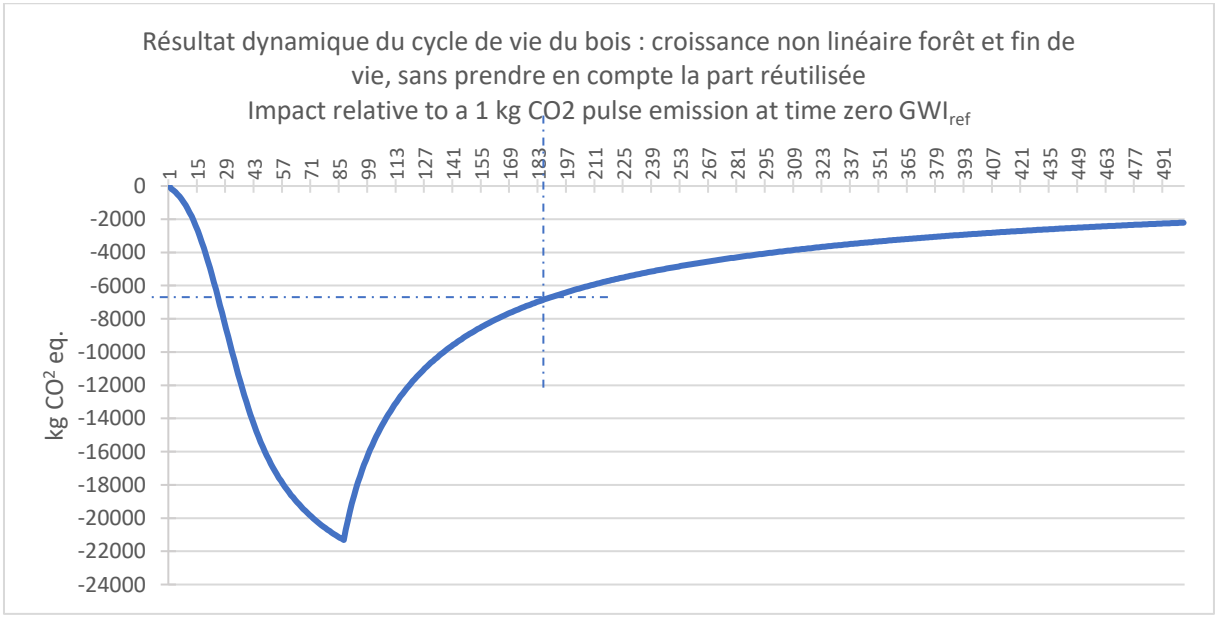
[18] Cherubini, Francesco & PETERS, GLEN & Berntsen, Terje & Strømman, Anders & Hertwich, Edgar. (2011). CO2 emissions from biomass combustion for bioenergy: Atmospheric decay and contribution to global warming. GCB Bioenergy. 3. 413 - 426. 10.1111/j.1757-1707.2011.01102.x.

45	0,00480	1%	135 kg



Le prélèvement annuel de CO_2 suit donc une courbe sigmoïde en considérant la croissance du bois fonction du temps et de la période de rotation.

9.1.3.2.4.2 Analyse de sensibilité : dynamique de prélèvement de carbone en phase de croissance. Résultats :



En considérant un prélèvement de carbone linéaire sur les 45 ans, le résultat à l'année 186 était de -6 710 kg CO_2 eq. et en tenant compte du prélèvement non linéaire de carbone par la forêt il est de -6 785 kg CO_2 eq. La différence est donc négligeable (1% de différence).

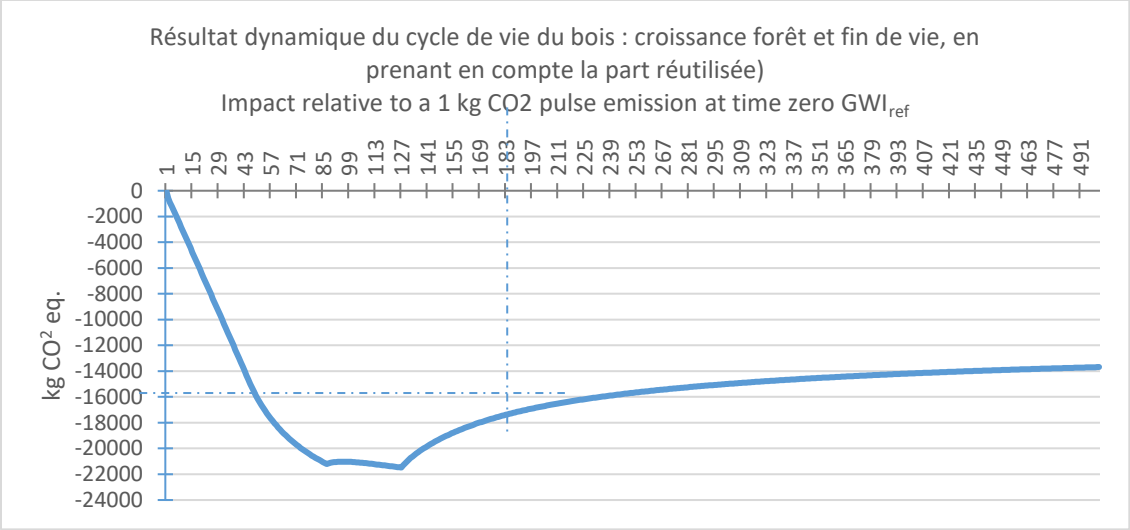
9.1.3.2.5 Cycle de vie du bois, scénario réutilisation du bois prise en compte : méthode d'intégration à l'ACV

Ici on considère que 57,1% du bois est réutilisé pendant 40 ans après le démantèlement de la maison du cas d'étude et subissant une fin de vie à la 126ème année (hypothèse 100% incinéré). *Rappel : dans*

les cas précédents, ces 57,1% supposés réutilisés étaient modélisés en suivant la norme EN 15904 i.e. par une émission de CO_2, également en dynamique à l'année 87.
On a donc les émissions suivantes en tenant compte de la réutilisation (inventaire via SimaPro) :

	Quantité émise dans l'air	
	Année 87 :	Année 127 :
Carbon dioxide, fossil*	2 528 kg	12 264 kg
Methane, biogenic	25 kg	0,05 kg
Methane, fossil	0,04 kg	0,14 kg
Dinitrogen monoxide	0,01 kg	0,04 kg
Flux restants émis par la fin de vie	3,4 kg	14 kg

9.1.3.2.6 Cycle de vie du bois, scénario réutilisation du bois prise en compte : Résultats



L'impacts est encore plus négatif. En intégrant sur 100 ans après la dernière émission qui a donc lieu à l'année 126, le résultat à l'année 227 est de -16 116 kg CO_2 eq (rappel : il était de -6 710 kg CO2 eq. sans considérer les émissions après réutilisation).
Ceci s'explique par le fait que les émissions ayant lieu à l'année 127 (année de la dernière émission) ont un facteur de caractérisation plus faible que celles émises à l'année 87 : pour le CO_2 par exemple, 6,8E-16 pour l'année 127 contre 7,4E-16 pour l'année 87 (les facteurs de caractérisation dynamiques correspondent aux forçages radiatifs intégré à chaque année).

9.1.3.2.1 Cycle de vie du bois et phase d'utilisation (scénario sans réutilisation du bois prise en compte) : méthode d'intégration à l'ACV.

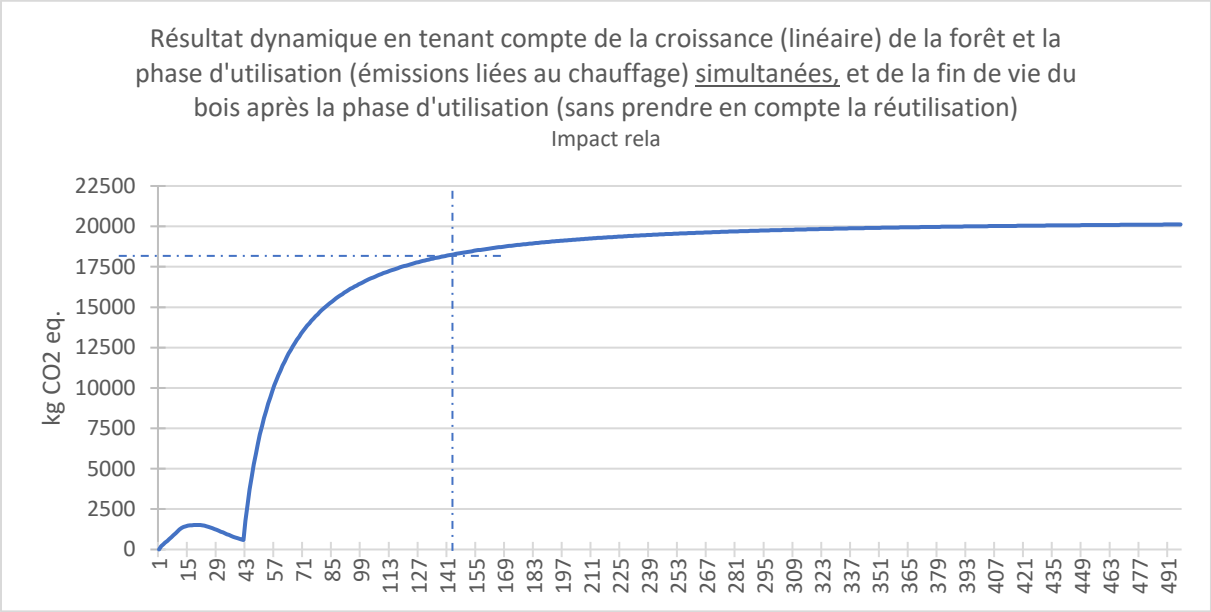
On fait ici le scénario suivant : croissance du bois parallèle au chauffage de la maison (avec le mix prospectif), avec la fin de vie de cette dernière après les 41 années d'utilisation (sans phase de réutilisation).

Durant les 41 premières années, le flux de prélèvement de CO_2 par la croissance du bois (supposée ici linéaire), soit 597 kg de CO_2 / an, est soustrait aux émissions de CO_2 générées par la production d'électricité, toutes les autres émissions liées à l'utilisation du mix prospectif décrites dans la partie

9.1.3.2.1 restant les mêmes par ailleurs. La croissance de la forêt durant 45 ans (phase d'utilisation sur 41 ans), il y a un flux de CO_2 prélevé dans l'atmosphère les 4 dernières années (597 kg / an).

9.1.3.2.2 Cycle de vie du bois et phase d'utilisation (scénario sans réutilisation du bois prise en compte) : Résultats

En considérant également la fin de vie (sans prendre en compte la réutilisation) ayant lieu à l'année 42 (on soustrait donc les 597 kg de CO2 captés par la forêt aux 26 729 kg CO_2 émis, et on émet 59,09 kg de CH_4 et 0,019 de N_2O), voici le résultat :

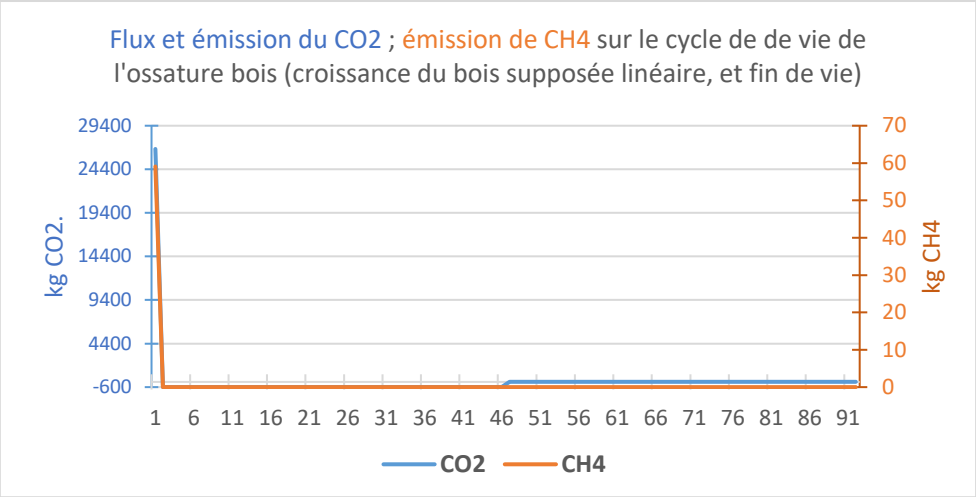


100 ans après la dernière émission ayant lieu à l'année 42, le résultat est de 18 243 kg CO_2 eq.
Les émissions liées à la production d'électricité (tendant vers une décarbonation dans l'exemple du mix prospectif utilisé) prennent donc le pas sur l'impact total, la captation de carbone par la croissance du bois n'étant utile que pour « contrebalancer » les émissions liées à la fin de vie de ce dernier. Compenser les émissions liées à la production d'électricité nécessiterait de planter un très grand nombre d'arbres, et de surcroît d'éviter une fin de vie émettrice de GES pour ces derniers…

9.1.3.3 Illustration des dynamiques de captage/émission ou émission/captage

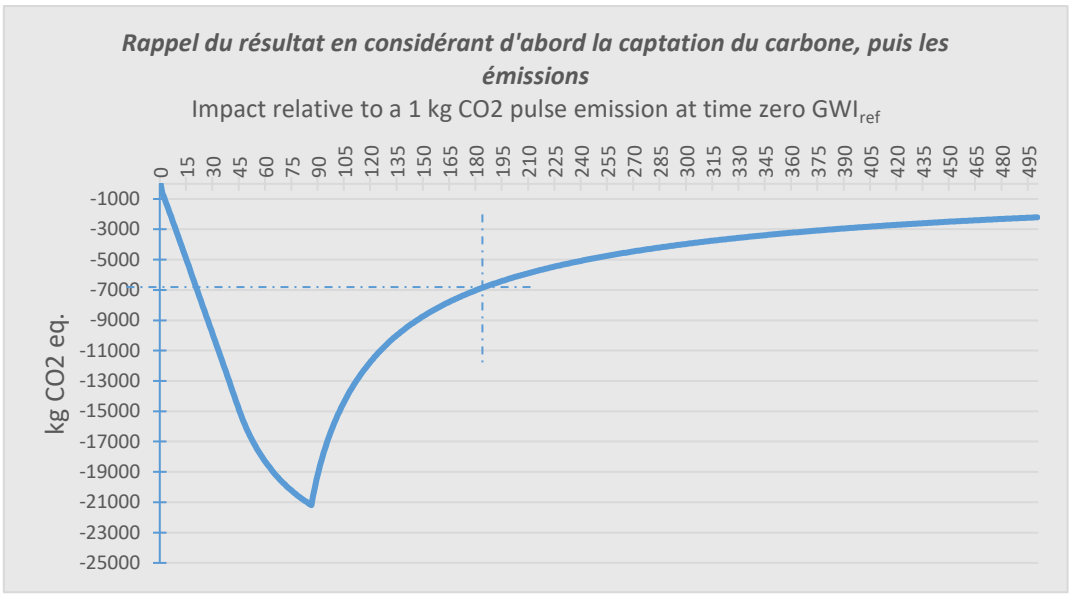
9.1.3.3.1 Méthode d'intégration à l'ACV

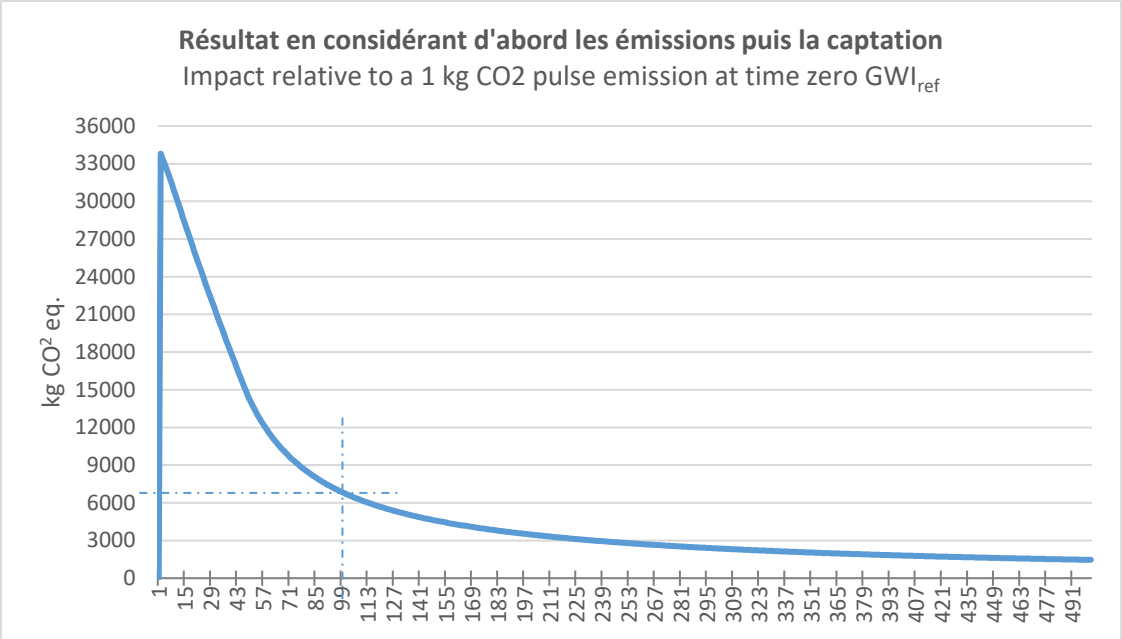
Dans les cas ci-dessus, on fait l'hypothèse que le carbone est d'abord séquestré, par sa captation par le bois en croissance, puis émis lors de la fin de vie de la structure du bâtiment. Or dans une logique d'action « compensation carbone », c'est l'inverse : il y a d'abord les émissions de gaz à effet de serre, puis un stockage. On teste donc ce deuxième scénario en modélisant dans DYNCO2 les émissions liées à la fin de vie du bois à l'année 1 (scénario 15804+A1, sans considérer la réutilisation du bois), puis à partir de l'année 2 on modélise le prélèvement du CO_2 par la croissance de la forêt (597 kg CO_2 prélevés chaque année).



N.B. : l'émissions de N_2O n'est pas représentée dans le graphe de flux ci-dessus (trop faible).

9.1.3.3.2 Résultats





Par rapport au cas où l'on considère en premier le stockage, la conclusion est tout autre : l'impact GWP 100 ans après la dernière émission (à l'année 101 donc) est de +6 670 kg CO_2 eq., alors qu'il était négatif en considérant la captation en premier lieu.

10 Conclusions

- Les évolutions dans les facteurs de caractérisation fournis par le GIEC, rapport après rapport, sont significatives. Cependant, les différences observées dans le cadre du cas d'étude son mineures.
- L'horizon temporel majoritairement recommandé et utilisé est 100 ans.
- De plus en plus d'études recommandent d'avoir recours à l'indicateur GTP
- Les dynamiques temporelles liées à la caractérisation des impacts des émissions de GES mènent à des variations importantes de résultats et d'interprétation,
    - Notamment, les dynamiques temporelles liées aux flux de carbone biogénique en phase d'inventaire mènent à des conséquences dont il est important d'évaluer les effets sur le climat de façon dynamique,
- Ces deux derniers points ainsi qu'une série de publications dans le domaine du bâtiment conduisent à penser qu'un cas d'étude dans le secteur est particulièrement intéressant pour illustrer les méthodes, résultats, et recommandations correspondantes.

- Dans le cas de notre cas d'étude, **l'utilisation des GTP ne modifie pas les conclusions** par rapport à l'utilisation classique des GWP.

- De même, la **prise en compte des NTCFs** ne change pas les conclusions générales de l'étude.

- La **prise en compte de la distribution temporelle des émissions de GES**, en utilisant les **GWP dynamiques**, a quant à elle un **impact non négligeable sur les résultats.**

    - En particulier la **comptabilisation du carbone biogénique**, et l'enchainement dans le temps des **phénomènes de séquestration / relargage** associés, entraîne dans notre cas d'étude une **diminution importante de l'impact changement climatique. On peut, par extension, envisager des impacts importants liés au recours à cette approche dynamique également dans le cas de produits fossiles à longue durée de vie (e.g. éléments plastiques utilisés dans le bâtiment).**

    - Il est à noter que d'un point de vue opérationnel, l'intégration de cette dynamique dans le logiciel SimaPro n'est pas envisageable (sauf à intégrer un facteur de caractérisation par année d'émission et par GES, ce qui complexifierait significativement la phase d'inventaire). Cette intégration nécessite donc la manipulation d'outils multiples (au moins deux : un outil d'ACV et un outil de calcul dynamique) ce qui rend l'approche peu ergonomique.

    - Le recours à l'outil DYNCO2 dans le cadre des présents travaux a permis une première approche dynamique, sur un outil :

        - ✓ gratuit,
        - ✓ de type excel, pour une bonne facilité de prise en main et une simplicité d'utilisationn
        - ✓ basé sur le 5ème rapport du GIEC (2013) : 207 substances caractérisées
        - ❖ de calcul d'impact à partir d'un inventaire d'émissions annuelles

- nécessitant de connaître les émissions de chaque substance du système (en cycle de vie), via un logiciel d'ACV permettant d'obtenir les inventaires des différentes substances émises…
- nécessitant une maîtrise de base d'un logiciel d'ACV pour en extraire les informations pertinentes
- dont les calculs et enregistrements sont assez longs (quelques minutes),
- Qui, de façon concrète, multiplie par 2 à 5 le temps passé sur l'évaluation.

11 Recommandations

- L'utilisation des **GWP dynamiques** entraîne des modifications potentiellement importantes par rapport à une approche statique. Nous recommandons de **limiter cette utilisation** à des cas où il y a des **dynamiques de carbone biogénique ou d'émissions retardées de carbone fossile** , et uniquement en **complément d'une approche statique**.

- Cette mise en œuvre permet d'anticiper les exigences réglementaires, e.g. celles liées à la **RE2020** dans le domaine du bâtiment.

- Si l'expertise informatique est disponible en interne à l'équipe ACV, nous recommandons de comparer les fonctions de l'outil DYNCO2 avec celles disponibles dans **Brightway2 Temporalis**[19] avant de mettre en œuvre l'ACV dynamique. Cet outil pourrait permettre de lever les limites identifiées dans la présente étude lors de la mise en œuvre de DYNCO2.

- Ce type d'outil devrait permettre de distinguer les émissions liées aux **infrastructures** du bâti (qui ne devraient être renseignées qu'à l'année 1) de celles liées au démantèlement (qu'à la dernière année), et les émissions liées aux infrastructures nécessaires tout au long du process de production (de type transport), à chaque année. Ces éléments, non disponibles dans l'usage du couple SimaPro / DYNCO2, rendent l'analyse inexacte (bien que ces éléments jouent à la marge).

- Concernant **l'enchaînement temporel** de la captation et des émissions, la vision **conservatrice** est d'abord de considérer les émissions, puis le captage.

- Par ailleurs, nous recommandons **de manière pratique** de fixer un horizon temporel correspondant à 100 ans **après** la dernière émission. De cette manière, il est assuré de ne pas exclure du calcul d'impact des émissions de GES.

[19] https://brightway2-temporalis.readthedocs.io/en/latest/index.html

12 References

Albers A, Avadí A, Benoist A, Collet P, Hélias A (2019a) Modelling dynamic soil organic carbon flows of annual and perennial energy crops to inform energy-transport policy scenarios in France. The Science of the total environment:135278. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135278

Albers A, Collet P, Benoist A, Hélias A (2019b) Back to the future. Dynamic full carbon accounting applied to prospective bioenergy scenarios. Int J Life Cycle Assess 25354(5952):1. doi:10.1007/s11367-019-01695-7

Albers A, Collet P, Lorne D, Benoist A, Hélias A (2019c) Coupling partial-equilibrium and dynamic biogenic carbon models to assess future transport scenarios in France. Applied Energy 239:316–330. doi:10.1016/j.apenergy.2019.01.186

Benoist A (2009) Elements d'adaptation de la méthodologie d'analyse de cycle de vie aux carburants végétaux. Cas de la 1ère génération

Cherubini F, Fuglestvedt J, Gasser T, Reisinger A, Cavalett O, Huijbregts MAJ, Johansson DJA, Jørgensen SV, Raugei M, Schivley G, Strømman AH, Tanaka K, Levasseur A (2016) Bridging the gap between impact assessment methods and climate science. Environmental Science & Policy 64:129–140. doi:10.1016/j.envsci.2016.06.019

Cherubini F, Peters GP, Berntsen T, Strømman AH, Hertwich E (2011) CO2 emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming. GCB Bioenergy 3(5):413–426. doi:10.1111/j.1757-1707.2011.01102.x

Kendall A (2012) Time-adjusted global warming potentials for LCA and carbon footprints. The International Journal of Life Cycle Assessment 17(8):1042–1049. doi:10.1007/s11367-012-0436-5

Levasseur A, Cavalett O, Fuglestvedt JS, Gasser T, Johansson DJA, Jørgensen SV, Raugei M, Reisinger A, Schivley G, Strømman A, Tanaka K, Cherubini F (2016) Enhancing life cycle impact assessment from climate science. Review of recent findings and recommendations for application to LCA. Ecological Indicators 71:163–174. doi:10.1016/j.ecolind.2016.06.049

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 & technology 44(8):3169–3174. doi:10.1021/es9030003

Ocko IB, Hamburg SP, Jacob DJ, Keith DW, Keohane NO, Oppenheimer M, Roy-Mayhew JD, Schrag DP, Pacala SW (2017) Unmask temporal trade-offs in climate policy debates. Science (New York, N.Y.) 356(6337):492–493. doi:10.1126/science.aaj2350

Rosa M de, Pizzol M, Schmidt J (2018) How methodological choices affect LCA climate impact results. The case of structural timber. Int J Life Cycle Assess 23(1):147–158. doi:10.1007/s11367-017-1312-0

Shine KP (2009) The global warming potential—the need for an interdisciplinary retrial. Climatic Change 96(4):467–472. doi:10.1007/s10584-009-9647-6

Shine KP, Allan RP, Collins WJ, Fuglestvedt JS (2015) Metrics for linking emissions of gases and aerosols to global precipitation changes. Earth Syst. Dynam. 6(2):525–540. doi:10.5194/esd-6-525-2015

Shine KP, Fuglestvedt JS, Hailemariam K, Stuber N (2005) Alternatives to the Global Warming Potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases. Climatic Change 68(3):281–302. doi:10.1007/s10584-005-1146-9

Sterner E, Johansson DJA, Azar C (2014) Emission metrics and sea level rise. Climatic Change 127(2):335–351. doi:10.1007/s10584-014-1258-1

Collinge, W.O., Landis, A.E., Jones, A.K., Schaefer, L.A., Bilec, M.M., 2014. Productivity metrics in dynamic LCA for whole buildings: Using a post-occupancy evaluation of energy and indoor environmental quality tradeoffs. Build. Environ. 82, 339–348. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.032

Collinge, W.O., Landis, A.E., Jones, A.K., Schaefer, L.A., Bilec, M.M., 2013. Dynamic life cycle assessment : framework and application to an institutional building 538–552. https://doi.org/10.1007/s11367-012-0528-2

Cornillier, C., Benoist, A., Gleizes, O., 2015. Etude preliminaire à la realisation de bilans environnementaux sur le chauffage au bois. Partie 1 : Etat de l'art. Ademe.

Faraca, G., Tonini, D., Astrup, T.F., 2019. Dynamic accounting of greenhouse gas emissions from cascading utilisation of wood waste. Sci. Total Environ. 651, 2689–2700. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.136

Fouquet, M., Levasseur, A., Margni, M., Lebert, A., Lasvaux, S., Souyri, B., Buhé, C., Woloszyn, M., 2015. Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment. Build. Environ. 90, 51–59. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.022

Frischknecht, R., Jolliet, O., 2016. Global Guidance for life cycle indicators impact assessment : Volume 1, Annual Review of Nutrition.

Intergovernmental Panel on Climate Change, 1992. Climate Change: The IPCC 1990 and 1992 Assessments, Intergovernmental Panel on Climate Change. https://doi.org/10.3917/etr.0874.0445

Joos, F., Roth, R., Fuglestvedt, J.S., Peters, G.P., Enting, I.G., Von Bloh, W., Brovkin, V., Burke, E.J., Eby, M., Edwards, N.R., Friedrich, T., Frölicher, T.L., Halloran, P.R., Holden, P.B., Jones, C., Kleinen, T., Mackenzie, F.T., Matsumoto, K., Meinshausen, M., Plattner, G.K., Reisinger, A., Segschneider, J., Shaffer, G., Steinacher, M., Strassmann, K., Tanaka, K., Timmermann, A., Weaver, a. J., 2013. Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: A multi-model analysis. Atmos. Chem. Phys. 13, 2793–2825. https://doi.org/10.5194/acp-13-2793-2013

Levasseur, A., n.d. DYNCO2 : Le bilan carbone de nouvelle génération grâce au Calculateur d'empreinte carbone dynamique V1.0. Manuel D'instruction 1–16.

Levasseur, A., Brandão, M., 2014. Etat de l'art sur le stockage/déstockage du carbone par la biomasse au sein des ACV. Etude SCORE LCA n° 2013-02 – RAPPORT FINAL.

Liu, W., Yan, Y., Wang, D., Ma, W., 2018. Integrate carbon dynamics models for assessing the impact of land use intervention on carbon sequestration ecosystem service. Ecol. Indic. 91, 268–277. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.087

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., Zhang, H., 2013. Anthropogenic and natural radiative forcing, in: Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. pp. 659–740. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018

Negishi, K., Lebert, A., Almeida, D., Chevalier, J., Tiruta-Barna, L., 2019. Evaluating climate change pathways through a building's lifecycle based on Dynamic Life Cycle Assessment. Build. Environ. 164. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106377

Negishi, K., Tiruta-Barna, L., Schiopu, N., Lebert, A., Chevalier, J., 2018. An operational methodology for applying dynamic Life Cycle Assessment to buildings. Build. Environ. 144, 611–621. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.005

Resch, E., Andresen, I., Cherubini, F., Brattebø, H., 2021. Estimating dynamic climate change effects of material use in buildings—Timing, uncertainty, and emission sources. Build. Environ. 187. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107399

Roux, C., Schalbart, P., Assoumou, E., Peuportier, B., 2016. Integrating climate change and energy mix scenarios in LCA of buildings and districts. Appl. Energy 184, 619–629. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.043

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., 2007. Climate change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Yan, Y., 2018. Integrate carbon dynamic models in analyzing carbon sequestration impact of forest biomass harvest. Sci. Total Environ. 615, 581–587. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.326