

Etude N°2023-02 DIMENSION DYNAMIQUE EN ACV

Rapport final
Octobre 2024



Version	Octobre 2024	
Rédaction	Vérification	Approbation
I.DESCOS, J. VANDEPUTTE, B. DE CAEVEL (RDC Environment)	Philippe OSSET (SCORE LCA)	Marion DEVIENNE (SCORE LCA)

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, Dimension dynamique en ACV, 2024, 81 pages, n°2023-02.
- 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.

Pour la synthèse en anglais :

- SCORE LCA is an association that has been created to financially support collaborative research on LCA and related topics. It aims to promote and organize cooperation between companies, institutional and scientists in order to support the evolution of LCA methods and its practical implementation at European and international level.
- This work has been supported by ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) www.ademe.fr
- The views and recommendations expressed in this publication are those of the authors and do not necessarily reflect, unless otherwise stated, the views of all members of SCORE LCA.
- The information and conclusions presented in this document were established on the basis of scientific and technical data and regulatory and normative framework in force at the date of the publication of documents.

RESUME

SCORELCA a souhaité investiguer l'état de l'art des pratiques de l'ACV Dynamique, afin de développer des recommandations pour les praticiens sur les enjeux de l'ACV dynamique, les conditions pertinentes pour lancer une ACV dynamique et des éléments de guidance pratiques sur comment faire.

Même s'il existe quelques publications et études sur le sujet, l'étude a tout d'abord permis de fournir une définition de l'ACV dynamique.

« ACV qui prend en compte, quand il est pertinent de le faire, la temporalité des étapes du cycle de vie auxquelles on ajoute la variabilité des modèles d'impacts et des données ».

L'ACV dynamique peut se pratiquer sur différentes données utiles au calcul des impacts environnementaux :

- Les données d'activité : en faisant varier les valeurs de ces données dans le temps, pour mettre en évidence des innovations (exemple : réduction du poids d'un composant)
- Les procédés unitaires utilisés dans les bases de données : en faisant varier les inventaires unitaires utilisés dans les bases de données, ou en utilisant d'autres pour modéliser l'avenir ; notons que cette pratique est rare aujourd'hui
- Les flux élémentaires : en faisant varier les émissions dans le temps (exemple : émission à certaines saisons)
- Les facteurs de caractérisation : en faisant varier la « gravité » des impacts en fonction du moment de l'émission par rapport aux enjeux environnementaux étudiés (exemple : évolution des PRG en fonction du temps)

L'étude a ensuite fourni quelques éléments concernant les enjeux liés à la temporalité et l'intérêt de raisonner en approche dynamique

- Le risque de comparer des produits inégalement : si certains produits connaissent des captations et émissions à des étapes différentes du cycle de vie (cas du bois construction qui capte du carbone à sa production et réémet en fin de vie tandis que la production du béton émet des GES qui sont en partie évités grâce à son recyclage en fin de vie)
- Le risque de sur- ou sous-estimation d'impacts futurs générant de possibles erreurs de décisions (en les ramenant au temps t_0 dans l'approche statique) exemple : le bénéfice d'un recyclage dans 50 ans modélisé comme l'évitement d'une production de matière vierge avec les technologies actuelles risque d'être surestimé.
- Le fait de considérer un horizon temporel ne permettant pas de mettre en perspective l'impact environnemental exemple : la prise en compte d'un horizon temporel à 100 ans pour le réchauffement climatique ne permet pas de montrer l'urgence d'agir avec un horizon plus bas, où les impacts de certains gaz sont plus élevés (exemple du méthane)
- Le risque de négliger les effets de certaines molécules à court terme (les molécules organiques ont généralement tendance à se dégrader rapidement, malgré leurs effets toxiques à court terme/-

L'étude a ensuite détaillé quatre principaux critères pour lancer une ACV dynamique :

1. **Des systèmes qui varient dans le temps**
2. Un **aspect du cycle de vie particulièrement long** (>5-10 ans).
3. Des **impacts significatifs après le temps t_0** (>10%)
4. Des **phénomènes environnementaux qui varient en fonction de la temporalité des émissions**

Elle a proposé 15 fiches d'aide à la mise en œuvre du dynamisme en ACV.

Enfin, l'étude a permis de proposer une note à l'attention des instances de normalisation pour mieux considérer l'opportunité de conduire des ACV Dynamiques dans l'ACV.

MOTS CLES

ACV dynamique, émissions décalées, temporalité, longue durée de vie, horizon temporel, bénéfiques/ impacts futurs

SUMMARY

SCORELCA wants to investigate the state of the art of Dynamic LCA practices, in order to develop recommendations for practitioners on the challenges of Dynamic LCA, the relevant conditions for launching a Dynamic LCA and practical guidance on how to go about it.

Although there are a little publications and studies on the subject, the study first provided a definition of Dynamic LCA.

Dynamic LCA is defined as “A Dynamic LCA takes into account in the assessment, where relevant, not only the temporality of the sequence of life cycle stages, but also the temporal variability of impacts models: activity data, emission and consumption elementary flows, characterizations factors, as well as background systems used from databases”.

Dynamic LCA can be applied to various data used in environmental impact calculation:

- Activity data: by varying the values of these data over time, to highlight innovations (e.g. reducing the weight of a component).
- Unit processes used in databases: by varying these unit inventories, or by using others to model the future; Note: that this practice is rare today.
- Elementary flows: by varying emissions over time (e.g. emissions in certain seasons).
- Characterization factors: by varying the “severity” of impacts according to the time of emission in relation to the environmental issues studied (e.g.: GWP evolution as a function of time).

The study then provided some issues linked to temporality and the benefits of a dynamic approach :

- The risk of comparing products inequitably: if certain products capture and emit at different stages of the life cycle (e.g. timber, which captures carbon during production and re-emits it at the end of its life cycle, while concrete production emits GHGs that are partly avoided thanks to recycling at the end of its life cycle).
- The risk of over- or under-estimating future impacts, leading to possible decision-making errors (by taking them back to t0 time in the static approach). For example, the benefit of recycling in 50 years modelled as the avoidance of virgin material production with current technologies is likely to be overestimated.
- Considering a time horizon that does not allow environmental impact to be put into perspective, For example, taking a 100-year time horizon for global warming does not help to show the urgency of taking action with a lower time horizon, the impacts of certain gases are higher (e.g. methane).
- The risk of neglecting the short-term effects of certain molecules (e.g. organic molecules generally tend to degrade rapidly, despite their short-term toxic effects).

The study then detailed four main criteria for launching a dynamic LCA:

1. Systems that **vary over time**
2. A particularly **long life-cycle aspect** (>5-10 years).
3. **Significant impacts after time t0** (>10%).
4. Environmental phenomena that **vary according to the temporality of emissions**.

It proposed 15 methodological fiches to help implement dynamic LCA.

Finally, the study proposed a note for the standardization bodies to better consider the opportunity of conducting Dynamic LCA in LCA practice.

KEY WORDS

Dynamic LCA, time-shifted emissions, temporality, long life, time horizon, future burdens and avoided burdens

Glossaire

ACV – Analyse du Cycle de Vie
ACVD – Analyse du Cycle de Vie Dynamique
ADP – Abiotic resource Depletion Potential
CED – Cumulative Energy Demand
CExD – Cumulative Exergy Demand
CH₄ – Méthane
CO₂ – Dioxyde de carbone
ddv – Durée de vie
DHUP – Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages
EDP – Environmental Dissipation Potential
FA – Flux Agrégé
FC – Facteur de Caractérisation
FE – Flux Élémentaire
FEp – Flux Élémentaire primaire
FEs – Flux Élémentaire secondaire
FWL – Future Welfare Loss
GES – Gaz à Effet de Serre
GWP – Global Warming Potential
HT – Horizon Temporel
ICV – Inventaire du Cycle de Vie
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (équivalent du GIEC en anglais)
kg CO₂-eq – kilogramme de CO₂ équivalent
LCI – Life Cycle Inventory
LCIA – Life Cycle Impact Assessment
PCT – Pouvoir de Changement de Température
PRG – Pouvoir de Réchauffement Global
RE2020 – Réglementation Environnementale 2020
SBTi – Science Based Targets initiative

Table des matières

1	Introduction.....	8
1.1	Contexte de l'étude.....	8
1.2	Objectifs de l'Étude.....	9
2	État de l'art des pratiques actuelles	10
2.1	Définition conceptuelle de l'approche dynamique en ACV.....	10
2.2	Typologies d'approches dynamiques	12
2.3	Enjeux clés et motivation.....	14
2.3.1	Prise en compte de l'horizon temporel	14
2.3.2	Projection dans le futur et ACV prospective	18
2.3.3	Dynamisme à différents niveaux.....	18
2.3.4	Synthèse des typologies et enjeux clés.....	19
2.4	Cas d'utilisation de l'approche dynamique	20
2.4.1	Type de secteurs pertinents pour l'approche dynamique.....	20
2.4.2	Type de catégories d'impact pertinentes pour l'approche dynamique	22
2.4.3	Critères pour décider de conduire une ACV dynamique	26
2.4.4	Complémentarité avec l'ACV conséquentielle.....	29
2.5	Risques de ne pas considérer l'ACV dynamique	30
2.5.1	Risque de comparer des matériaux inégalement	30
2.5.2	Risque de mauvaises décisions liés à des choix prospectifs	30
2.5.3	Risque de négliger les effets de certaines molécules toxiques à très court terme	31
2.5.4	Risque de manquer de recul sur les catégories d'impacts.....	31
2.5.5	Risque de considérer la compensation comme un bénéfice immédiat vers la neutralité carbone 31	
2.5.6	Risque d'accumulation d'émissions liée à une prise de décision tardive	32
3	Comment pratiquer l'ACV dynamique ?.....	34
3.1	Lors du cadrage de modélisation	37
3.1.1	Fiche n°1 – Positionner les émissions dans le temps	37
3.1.2	Fiche n°2 – Réfléchir à un horizon temporel commun pour la comparaison de systèmes	40
3.1.3	Fiche n°3 – Définir des scénarios prospectifs	42
3.2	Lors de la collecte des données	44
3.2.1	Fiche n°4 – Faire varier les données d'activité.....	44
3.2.2	Fiche n°5 – Faire varier les flux élémentaires primaires	46
3.3	Lors de la construction des inventaires	48
3.3.1	Fiche n°6 – Faire varier les procédés d'arrière-plan	48
3.4	Lors de la caractérisation des impacts	50
3.4.1	Fiche n°7 – Considérer des horizons temporels adaptés.....	50
3.4.2	Fiche n°8 – Utiliser des facteurs de caractérisation dynamiques.....	53
3.5	Lors de l'interprétation des résultats.....	55
3.5.1	Fiche n°9 – Présenter des résultats dynamiques.....	55
3.5.2	Fiche n°10 – Faire des analyses de sensibilité pour montrer l'importance à considérer le facteur temps 57	
3.6	Aide à la sélection des fiches techniques pertinentes.....	59
3.7	Cas d'études.....	60
3.7.1	Cas 1 : Stockage d'acier dans du béton pendant une longue durée.....	60
3.7.2	Cas 2 : Gestion d'une décharge	65
3.8	Précautions à prendre lors d'une ACV dynamique	69
3.8.1	Les approches dynamiques trop simplifiées.....	69
3.8.2	Traiter les incertitudes via une approche par analyse de sensibilité	69
4	Limites et recommandations	70
4.1	Limites dans la pratique de l'ACV dynamique	70
4.1.1	Manque d'intégration des méthodes numériques en ACV	70

4.1.2	Faible disponibilité d'outils opérationnels	70
4.1.3	Temps et budget considérables.....	70
4.1.4	Manque de cas d'études dans la littérature.....	71
4.2	Recommandations générales lors de la pratique de l'ACV Dynamique.....	71
5	Bibliographie.....	73
6	Table des tableaux	76
7	Table des figures.....	77
8	Annexes.....	79
8.1	L'approche dynamique de la RE2020	79

1 Introduction

1.1 Contexte de l'étude

La prise en compte différenciée des impacts au cours du temps, appelée dimension dynamique, est une composante essentielle à considérer en Analyse du Cycle de Vie (ACV). Les impacts environnementaux ne surviennent pas de manière uniforme au fil du temps et peuvent varier en fonction de nombreux facteurs, tels que les étapes du cycle de vie du produit, les variations saisonnières ou encore les changements technologiques. Ainsi, la dimension dynamique enrichit la méthodologie conventionnelle de l'ACV en y ajoutant une perspective temporelle essentielle pour une évaluation environnementale complète et rigoureuse.

En particulier, l'ACV dynamique est particulièrement pertinente pour les cas suivants :

- **Évolution temporelle des flux** : À partir de la date d'émission ou de prélèvement d'un flux (molécule, élément chimique...), il existe une évolution de ce flux dans le temps (cinétique de dégradation, déplacement et interaction avec des organismes). En ACV, cela peut se traduire par une évolution du facteur de caractérisation (FC) d'une substance au cours du temps.
Par exemple, le potentiel de réchauffement global (PRG) d'un gaz dépend de la durée au cours de laquelle il est calculé. Un gaz rapidement éliminé de l'atmosphère peut avoir un effet initial important, mais qui décroît rapidement. Ainsi, le méthane possède un PRG de 27 à 30 sur un siècle, mais de 80 à 82,5 sur 20 ans ; à l'opposé, le PRG de l'hexafluorure de soufre est de 24 300 sur 100 ans mais de « seulement » 18 200 sur 20 ans. (Forster, et al. 2021)
Par ailleurs, le prélèvement futur de certaines ressources peut être plus ou moins critique selon l'état de leur réserve au moment de leur prélèvement (plus critique si la ressource n'est pas abondante ni extractible à faible coût).
- **Décalage temporel des impacts** : Les étapes du cycle de vie ayant lieu à des moments éloignés dans le temps (notamment l'usage et la fin de vie des produits à longue durée de vie) voient leurs effets décalés dans le temps.
C'est le cas pour les produits de certains secteurs comme les bâtiments, qui prélèvent de grandes quantités de ressources minérales et les immobilisent pendant environ 50 ans avant de les rendre à nouveau disponibles dans des processus de recyclage. Il en est de même avec la captation de carbone d'une forêt dont la ressource va être prélevée après, par exemple, 20 ans de croissance du bois, pour être transformée en panneaux de particules ou en énergie.
- **Approches prospectives et évolutions technologiques** : Les approches prospectives visant à raisonner à moyen ou long terme nécessitent de considérer les évolutions technologiques de façon dynamique.
Par exemple, les mix électriques des processus de fabrication et de recyclage doivent être adaptés à la situation projetée, en envisageant certaines tendances (décarbonation des mix électriques, optimisation de certains procédés devenant moins intenses en énergie ou avec de meilleurs rendements, ou avec moins d'émissions toxiques).

Actuellement, pour des raisons pratiques, les ACV négligent souvent l'approche dynamique en raison de :

- **Référentiels normatifs** : Certains référentiels préconisent de négliger cette approche. Par exemple, l'ISO 14067 sur l'empreinte carbone des produits indique que « toutes les émissions et captations de GES doivent être calculées comme si elles avaient lieu au début de la période d'évaluation sans tenir compte de l'effet d'émissions et de captations de GES différées », ce qui revient virtuellement à considérer toutes les étapes ayant lieu en même temps.
- **Facteurs de caractérisation prédéfinis** : Les bases de données proposent des horizons temporels prédéfinis. Par exemple, la base de données ecoinvent propose pour le potentiel de réchauffement climatique des horizons à 100 ans, voire 20, 50 ou 500 ans. Certaines méthodes de caractérisation évaluent des horizons temporels très lointains, empêchant de prendre en compte certains enjeux à court terme (ex : écotoxicité de certaines molécules et de leurs métabolites après dégradation non pris en compte dans l'écotoxicité).

- **Difficultés pratiques** : La mise en œuvre des ACV dynamiques est complexe, nécessitant un travail détaillé et des discussions complémentaires à la collecte de données et à la modélisation. Il est également nécessaire de connaître les courbes d'évolution temporelle des impacts des flux pour les caractériser. Des exemples d'analyses sont présentés dans les études SCORELCA « Prise en compte de la dimension Temps en ACV » (2015) et « Enjeu temporel de l'indicateur changement climatique en ACV » (2020), montrant que ces calculs nécessitent des fichiers Excel en annexe de l'ACV.
- **Manque de données et de budget** : Définir des scénarios futurs dans les études prospectives nécessite des discussions avec divers acteurs et des recherches auprès des porteurs de technologies et des pouvoirs publics (dans le cas d'évolutions réglementaires prévues) pour définir des inventaires adaptés aux situations projetées. Les choix peuvent également être conditionnés par la mise en œuvre de certaines politiques dont il est parfois difficile de prévoir les effets.

L'approche dynamique en ACV est toutefois clé et peut conduire à de fortes différences d'impacts¹ selon la prise en compte ou non de cette dimension dynamique, notamment dans certains types d'évaluations environnementales :

- Produits à longue durée de vie
- Produits induisant des phénomènes de stockage
- Produits induisant des émissions décalées dans le temps
- Scénarios prospectifs nécessitant des approches dynamiques

Si les discussions sont relativement développées sur les questions du carbone, il existe également des enjeux sur d'autres impacts, comme l'utilisation des ressources minérales et métalliques, la toxicité et l'épuisement des ressources en eau.

1.2 Objectifs de l'Étude

Dans ce contexte, les objectifs de cette étude sont de :

- Dresser un **état de l'art des pratiques** et des recommandations existant dans la littérature
- Proposer des **critères et seuils** pour indiquer quand il est nécessaire d'intégrer cette dimension dynamique
- Identifier les **effets de l'intégration d'une dimension dynamique**, notamment à travers les risques de ne pas considérer l'ACV dynamique
- Proposer des **fiches techniques** permettant de guider le praticien dans l'application de l'ACV dynamique
- Illustrer **l'application de ces fiches techniques** à travers deux cas d'études
- Proposer des **recommandations** sur la mise en œuvre de l'ACV dynamique
- Proposer un **argumentaire** synthétique dans le cadre de la normalisation à l'ISO/TC/207/SC5.

¹ Les différences d'impacts seront abordées en cas d'étude 1.

2 État de l'art des pratiques actuelles

2.1 Définition conceptuelle de l'approche dynamique en ACV

L'approche dynamique en ACV peut être définie conceptuellement comme une :

« **ACV qui prend en compte, quand il est pertinent de le faire, la temporalité des étapes du cycle de vie auxquelles on ajoute des modèles d'impacts qui prennent en compte la variabilité des enjeux environnementaux associés.»**

Cette définition, inspirée des travaux de (Sohn, et al. 2020) et de (Beloïn-Saint-Pierre, et al. 2020), lie toute approche dynamique en ACV avec la prise en compte de changements temporels, soit lors de l'établissement d'une donnée d'inventaire, soit lors de l'évaluation d'un impact environnemental.

L'enjeu de pertinence est également important dans la démarche. Toute ACV devrait être dynamique, sauf quand il n'est pas pertinent de le faire, *i.e.* quand l'apport de l'ACV dynamique sur les résultats par rapport à l'ACV statique n'est pas suffisamment différenciant pour justifier le temps supplémentaire pris par le praticien pour réaliser l'ACV dynamique. L'enjeu de pertinence peut être évalué au moyen de différents critères.

Pour rappel, en ACV, comme représenté en Figure 1, on calcule des impacts environnementaux en multipliant des **flux agrégés (FA)** – représentant l'agrégation de **données d'activité**² et de **flux élémentaires (FE)**³ du système étudié – par des **facteurs de caractérisation**⁴ (FC). Ces FA et FC sont donc fixés dans le temps car publiés tels quels par les producteurs des données d'inventaire (FE) et les éditeurs des modèles de caractérisation (FC), respectivement.

Par exemple, comme représenté en Figure 1, lorsqu'on souhaite modéliser l'impact d'une utilisation de l'eau en ACV conventionnelle, on associe une consommation (ex. 2L d'eau) à un FC fixe qui représente, en moyenne, l'impact de l'utilisation de l'eau, peu importe la saisonnalité de la consommation (hiver ou été).

En ACV dynamique, de manière simplifiée, on intègre les variabilités temporelles liées à cette consommation (ex. on consomme uniquement de juin à août) et on y associe des FC qui représentent l'impact de l'utilisation de l'eau selon la saison. En effet, comme le montre le graphique, le niveau des nappes phréatiques est nettement plus bas en été qu'en hiver, ce qui aura un impact sur la disponibilité de la ressource, et donc sur les impacts finaux mesurés par l'ACV.

² Les données d'activité sont des données brutes spécifiques et précises qui sont collectées ou mesurées pour décrire les systèmes étudiés. Elles sont également appelées « données primaires ».

³ Un flux élémentaire représente une matière ou énergie entrant ou sortant du système étudié. Ils sont issus des bases de données. Un procédé d'inventaire est un regroupement de nombreux flux élémentaires.

Par exemple, il peut s'agir de x kg de cuivre en entrée de procédé, ou y kg de CO₂ émis en sortie de procédé.

⁴ Un facteur de caractérisation a pour but de convertir les flux élémentaires issus des bases de données en une unité commune d'indicateur. Les valeurs associées aux FC sont établis par des modèles de caractérisation publiés par des scientifiques. Par exemple, un FC permettra de transformer un émission de x kg de méthane en y kg CO₂-équivalents. L'unité du FC en question est donc de kg CO₂-eq/kg CH₄.

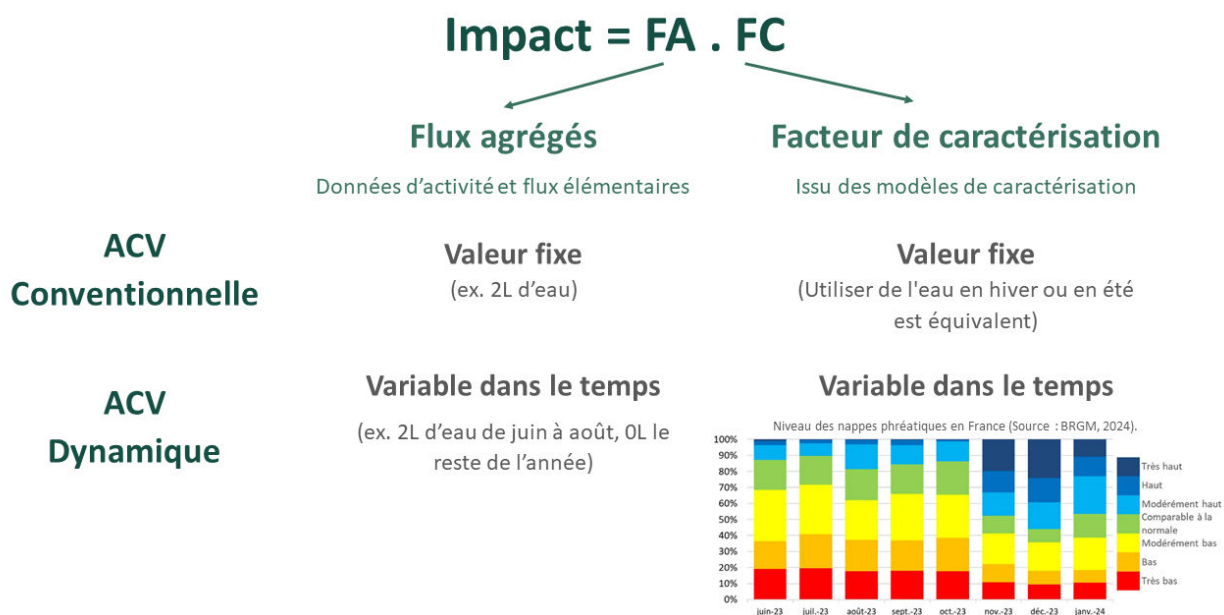


Figure 1 - Représentation des flux élémentaires et facteurs de caractérisation dans le cas d'une ACV conventionnelle et dynamique, avec un exemple pour l'utilisation de l'eau. Le graphique est issu du BRGM et représente le niveau des nappes phréatiques en France métropolitaine entre juin 2023 et janvier 2024 (BRGM 2024).

2.2 Typologies d'approches dynamiques

Comme introduit dans le chapitre précédent, et en particulier dans la Figure 1, le calcul d'impacts environnementaux en ACV consiste en la multiplication de **flux agrégés (FA)** par des **facteurs de caractérisation (FC)**. Ces flux agrégés sont en réalité constitués de **données d'activité (DA)** multipliées par des **procédés unitaires** – eux-mêmes constitués d'une somme de **flux élémentaires secondaires (FES)** – et de **flux élémentaires primaires (FEP)**, comme représenté en Figure 2.

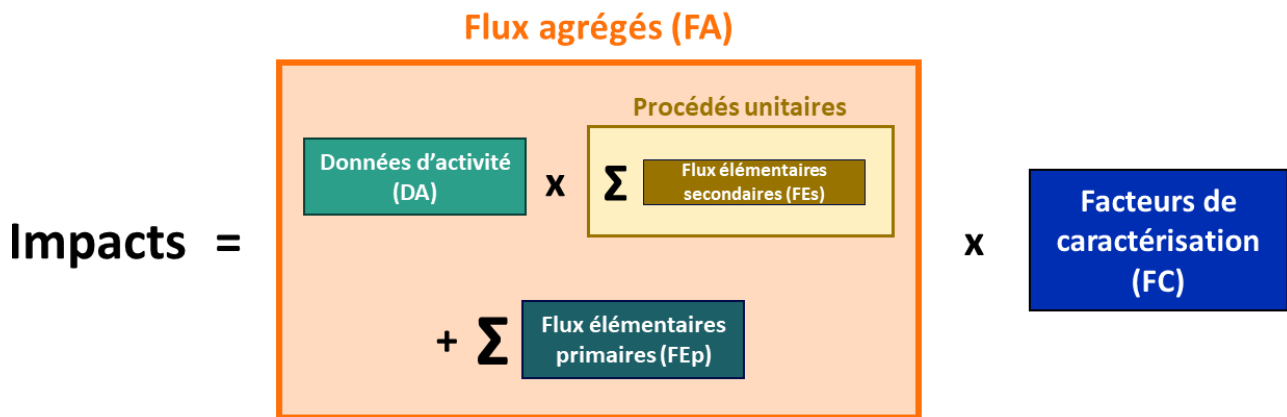


Figure 2 - Représentation schématique des éléments constitutifs de l'ACV.

Par exemple, si l'on souhaite mesurer les impacts liés à la production de chaleur au moyen d'une chaudière à gaz naturel, la donnée d'activité serait la quantité de m³ de combustible nécessaire, auquel on couplerait le procédé unitaire lié à la combustion de 1 m³ de gaz naturel. On peut alors y ajouter des flux élémentaires primaires liés à certaines émissions de NO_x ou de dioxines lors de la combustion du gaz. Ainsi, les différents éléments pouvant être rendus dynamiques sont présentés dans le Tableau 1.

En ACV Dynamique, chacun de ces éléments peut être rendu dynamique séparément au moyen de différentes approches. On parle d'ACV Dynamique **complète** quand tous ces éléments constitutifs de l'ACV sont dynamiques, d'ACV Dynamique **partielle** quand seulement certains éléments le sont.

Note : Selon les cas et la pertinence des études, une ACV dynamique partielle n'a pas nécessairement de sens ; il convient de s'interroger sur toutes les dimensions pertinentes où intégrer du dynamisme pour garantir de mener une approche correcte de l'ACV dynamique.

Sur base des différents éléments constitutifs de l'ACV, on définit alors des typologies d'approches dynamiques telles que décrites et illustrées dans le Tableau 1. On ne définit pas de typologie d'ACV dynamique pour les flux agrégés mais plutôt au niveau de leurs 3 éléments constitutifs (données d'activité, procédés unitaires, flux élémentaires primaires).

Par ailleurs, il est important de noter que l'un des enjeux de l'ACV dynamique est de regarder les consommations et émissions **à chaque instant du cycle de vie**. En d'autres termes, il ne s'agit donc pas simplement de se projeter à une date donnée dans le futur, mais de considérer l'évolution des flux élémentaires et de les repositionner sur une échelle de temps.

Enfin, bien que certaines typologies d'ACV dynamiques ne soient pas associées à une action directe des **praticiens** de l'ACV, il est important de noter que ce dernier est lié à chacune d'entre elles, directement ou indirectement. En effet, bien que ce soient les experts collaborant au développement des modèles de caractérisation qui publient les FC, c'est au praticien de mettre en œuvre ces FC dans son ACV. Par exemple, pour l'utilisation de l'eau, la méthode AWARE (Boulay, et al. 2018) publie des FC par année et par mois, et le praticien est libre de choisir la granulométrie temporelle.

Tableau 1 - Les 4 typologies d'ACV dynamiques.

Typologie	Description	Acteur principal	Exemple
Données d'activité	Variabilité au niveau des activités du système étudié	Praticien ACV	- Consommation de 10L d'eau en hiver et 0L en été - Allègement de 10 à 5 kg de métal par UF sur 15 ans
Procédés unitaires	Variabilité au niveau du choix du procédé d'inventaire	Praticien ACV	- Passage progressif d'utilisation d'énergie fossile à renouvelable sur 20 ans - Substitution de l'acier par du plastique pour la carrosserie d'une voiture
	Variabilité au niveau des flux élémentaires secondaires au sein du procédé	Développeur des données	- Réduction d'une émission liée à une évolution du rendement d'un procédé chimique
Flux élémentaires primaires	Variabilité au niveau des matières/énergies entrantes/sortantes d'un procédé d'inventaire	Praticien ACV	- Variation d'une quantité de polluant dans l'eau
Facteurs de caractérisation	Variabilité au niveau de l'indicateur évalué	Experts collaborant au développement des modèles de caractérisation	- Distinction hiver/été pour la consommation en eau - Evolution du PRG ⁵ du méthane au fil des années

⁵ Le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG), ou Global Warming Potential (GWP) en anglais, est une mesure qui évalue la capacité d'un gaz à effet de serre à contribuer au réchauffement climatique. Le PRG d'un gaz n'est pas toujours constant et évolue au cours du temps, en fonction de sa cinétique de dégradation dans l'atmosphère.

2.3 Enjeux clés et motivation

Après avoir présenté les concepts théoriques associés à l'ACV Dynamique, plusieurs enjeux clés associés à cette pratique et que l'ACV conventionnelle ne sait pas bien gérer aujourd'hui sont présentés ci-dessous.

2.3.1 Prise en compte de l'horizon temporel

En ACV conventionnelle, pour évaluer les impacts futurs ou qui évoluent dans le temps d'une activité, il est fréquent de définir un horizon temporel représentant la durée sur laquelle ces impacts sont évalués. Ces horizons temporels sont souvent décriés en ACV conventionnelle du fait de leur caractère immuable dans le temps.

L'ACV Dynamique consiste, entre autres, en l'apport de plus de nuances et de variabilités temporelles dans la définition de ces horizons temporels, pour le cycle de vie et/ou pour la caractérisation des impacts.

Horizons temporels pour le cycle de vie

- **Gestion des émissions décalées dans le temps⁶**

En opposition à ce qui est fait en ACV conventionnelle, une émission aujourd'hui ne peut être comparée directement avec une émission future ramenée au temps t_0 après émissions. En effet, les impacts d'une activité à instant t ont une incidence qui évolue dans le temps. L'exemple le plus typique est l'effet de serre, où toute émission aujourd'hui contribue au stock de CO₂ accumulé dans l'atmosphère immédiatement, alors qu'une émission décalée qui y contribuera plus tard et pour plus longtemps.

A titre illustratif, le stockage de carbone dans des matériaux biosourcés à longue durée de vie n'est pas valorisé correctement en ACV conventionnelle⁷. En effet, en prenant l'exemple du bois, l'ACV conventionnelle considère que celui-ci a capté du CO₂ lors de sa production et qu'il en rejette lors de sa fin de vie du fait de son incinération, selon l'ISO 14067. Ainsi, on ne tient pas compte du fait que, lorsqu'il est utilisé dans des produits à longues durées de vie (ex. un bâtiment), le bois immobilise du carbone pendant toute cette durée, l'empêchant de se retrouver dans l'atmosphère⁸.

La prise en compte des émissions décalées dans le temps en ACV dynamique mène à des présentations de résultats tels qu'illustrées en Figure 3. Le résultat final n'est pas une valeur unique où l'on a ramené les impacts futurs au temps t_0 , mais un graphe représentant l'évolution de la contribution au changement climatique au cours du temps. En l'occurrence, ce graphe-ci permet de mieux représenter le fait qu'un bâtiment fait de matériaux biosourcés (courbe grise) a un effet bénéfique sur le changement climatique tout au long de sa durée de vie (ici 75 ans) du fait du stockage de carbone (la courbe est en dessous de zéro), et qu'il contribue au réchauffement climatique seulement en fin de vie. (Zieger, Lecompte and Hellouin de Menibus 2020)

⁶ Voir aussi l'étude SCORELCA N°2015-01 de la **Prise en compte de la dimension « temps » en ACV**

⁷ Mis à part lorsque le CO₂ biogénique est pris en compte.

⁸ Notons que

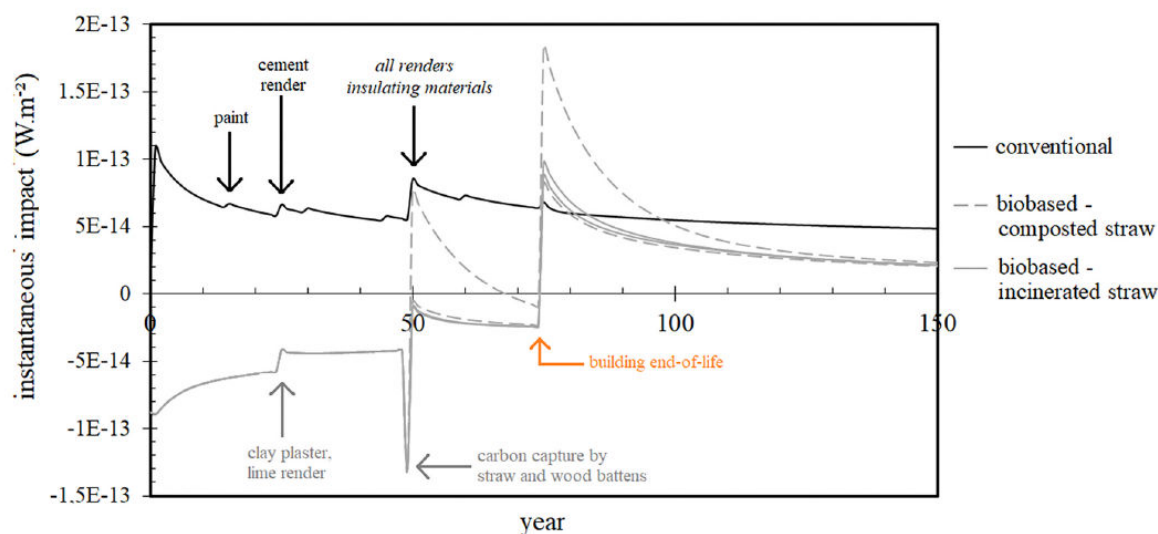


Figure 3 - Résultats d'une ACV dynamique comparant un mur construit en matériaux biosourcés (en gris) et conventionnels (béton et laine de verre, en noir) pour le changement climatique (en forçage radiatif), issu de (Zieger, Lecompte and Hellouin de Menibus 2020).

- **Conséquence : Allocation de bénéfices futurs et incertains**

La prise en compte des émissions décalées dans le temps permet une allocation plus juste de bénéfices futurs et incertains. En effet, en ACV conventionnelle, en ramenant tous les impacts futurs au temps t_0 , on perd toute information sur la dynamique du cycle de vie au cours de la durée de vie du produit étudié. Cette pratique peut mener à des prises de décisions qui paraissent aller dans le sens du développement durable alors que ce n'est pas le cas.

Par exemple, en reprenant l'exemple du bâtiment, en ACV conventionnelle, les impacts du cycle de vie de deux matériaux de construction comme le bois et le béton seront proches pour le changement climatique car, d'une part, le recyclage en fin de vie du béton contrebalance les impacts significatifs de sa production et, d'autre part, l'incinération du bois en fin de vie contrebalance les impacts favorables du stockage de carbone lors de la croissance des arbres.

Or, en prenant en compte la dynamique des systèmes, on se rend compte le bois a un effet bénéfique sur le changement climatique pendant plusieurs décennies (courbe grise dans la Figure 3) alors que le béton contribue au réchauffement climatique dès la première année (courbe noire dans la Figure 3).

L'approche dynamique peut ainsi apporter plus de finesse dans la comparaison entre ces deux matériaux. Il est donc indispensable de tenir compte du décalage dans le temps des émissions si les impacts sont significativement différents.

Horizons temporels pour la caractérisation des impacts

- **Impact du choix de l'horizon temporel sur les facteurs de caractérisation**

En ACV conventionnelle, les scientifiques publiant les modèles de caractérisation définissent des facteurs de caractérisation qui correspondent à une **moyenne d'impact sur une durée**, et qui sont donc immuables dans le temps. Ainsi, on obtient des FC implémentables dans les logiciels ACV. Les horizons temporels définis par les éditeurs des FC influencent alors les résultats de manière plus ou moins significative.

Par exemple, pour le changement climatique, lors de la prise en compte des émissions de gaz à effet de serre (GES), le modèle de caractérisation le plus couramment utilisé (*i.e.*, IPCC 2021) recommande de convertir ces émissions en « CO2 équivalents » au moyen de FC établis sur un horizon temporel à 100 ans.⁹

Le choix d'un horizon temporel à 100 ans est contesté dans la littérature. (Lawrence, et al. 2012). En effet, un horizon temporel à 20 ans reflète mieux l'urgence de réduire le réchauffement climatique à court terme, et la préoccupation quant au déclenchement de points de bascule irréversibles (fonte des glaces, fonte du permafrost...).

Cependant, ce choix est critiqué à son tour car le choix d'un horizon temporel à 20 ans néglige les impacts sur les générations futures, ce qui va à l'encontre des principes du développement durable : le changement climatique ne s'arrêtera pas après ces 20 ans. Le choix de l'horizon temporel d'un modèle de caractérisation est donc d'une importance majeure car il affecte les résultats finaux pour le changement climatique. (Shimako, Tiruta-Barna and Bisinella de Faria, et al. 2018)

Plus concrètement, l'impact du choix d'un horizon temporel est illustré par un cas d'étude issu de (Zieger, Lecompte and Hellouin de Menibus 2020) et repris dans le Tableau 2. L'unité fonctionnelle représente la capacité de loger une famille sur 300 ans. Cette période étant particulièrement longue, l'ACV conventionnelle avec un horizon temporel à 100 ans tronque en partie l'impact significatif de la fin de vie du scénario biosourcé. On observe également que l'horizon à 20 ans est en faveur du biosourcé (valeur très négative) car la fin de vie n'est pas encore comptabilisée, alors qu'à 500 ans les valeurs semblent se stabiliser autour de 12 kg CO₂-eq/UF pour le biosourcé (les résultats sont représentés par des gammes de valeurs associées aux incertitudes de la modélisation définies par les auteurs).

Tableau 2 - Résultats pour le changement climatique (en kg CO₂-équivalents) pour deux matériaux de construction différents selon l'horizon temporel considéré, issu de (Zieger, Lecompte and Hellouin de Menibus 2020).

Type d'ACV	Horizon temporel	Béton + laine de verre (kg CO ₂ -eq/UF)	Biosourcé (kg CO ₂ -eq/UF)
Conventionnelle	100 ans	79.8	26.3
	20 ans	60.0	-56.5
Dynamique	100 ans	70.8	[-22.2; -9.8]
	500 ans	71.8	[9.8; 14.3]
	1000 ans	71.2	[11.1; 13.7]

- **Horizons temporels pertinents pour la comparaison entre matières ou substances**

Selon la catégorie d'impact étudiée, l'établissement d'un horizon temporel unique peut apporter des incohérences au niveau de l'évaluation.

Par exemple, **pour la toxicité**, certains métaux et certaines matières organiques possèdent des propriétés toxiques importantes et plus ou moins persistantes. Il existe des matières organiques qui, comme elles se dégradent, sont plus toxiques que certains métaux, mais sur une durée plus courte car les métaux sont plus persistants dans l'environnement.

C'est le cas notamment de la dioxine, composé organique toxique, qui se stabilise dans tous les environnements après 100 jours, alors certains éléments métalliques comme le plomb mettent plus de 100 ans à se stabiliser dans les sols ou les milieux marins. (Fantke, Jolliet and Wannaz 2015)

En ACV à l'heure actuelle, les métaux et les matières organiques sont ramenées à un horizon temporel identique, ce qui implique que les matières organiques sont considérées comme nettement moins toxiques

⁹ En résumé, le modèle prend en compte une moyenne du PRG des GES sur 100 ans, avec une pondération de 1% pendant la première centaine d'années, suivie de 0% au-delà de cette période.

(voire non-toxiques) par rapport aux métaux. Or, à court terme, certaines substances organiques peuvent être bien plus toxiques et conduire à des effets irréversibles sur les organismes et les écosystèmes. La solution la plus simple pour remédier à ce problème serait de ramener la toxicité à une échelle par exemple annuelle et de permettre au praticien de choisir plusieurs horizons temporels pour évaluer la toxicité des matières prises en compte. (Owsianiak, et al. 2023)

- **Variations intermittentes des émissions**

Une émission peut avoir plus ou moins d'impact en fonction du moment où celle-ci a lieu. En ACV conventionnelle, les FC sont établis et immuables dans le temps.

Or, certaines molécules agissent différemment selon qu'elles soient émises le jour ou la nuit. C'est notamment le cas des précurseurs photochimiques comme démontré par (Shah and Ries 2009). On peut également penser aux effets sur l'humain d'un bruit émis le jour ou la nuit à intensité identique, comme étudié par (Cucurachi, Heijungs and Ohlau 2012). La **définition de FC discrets en ACV dynamique** permet d'intégrer ces variabilités temporelles par heure, jour, mois, saisons, années, etc.

Relation entre horizons temporels du cycle de vie et de la caractérisation

Les horizons temporels pour le cycle de vie et pour la caractérisation des impacts ont été présentés ci-dessus. Pour une évaluation correcte des impacts, ces deux horizons temporels doivent être mis en relation.

A titre illustratif, prenons le cas associé à la **Figure 4**. Supposons que l'on souhaite savoir s'il vaut mieux une fenêtre qui dure 50 ans (cas 1) ou deux fenêtres qui durent 25 ans (cas 2). L'unité fonctionnelle est de 50 ans (en vert foncé), et l'horizon temporel de la méthode de caractérisation utilisée est de 100 ans.

Si on garde l'horizon temporel à 100 ans de la méthode utilisée, une partie des impacts associés à la deuxième fenêtre du cas n°2 sera tronquée étant donné que les impacts de celle-ci sont décalés de 25 ans. Les impacts totaux du cas n°2 sont donc sous-estimés.

En ACV dynamique, le choix d'un horizon temporel plus long (ex. 200 ou 500 ans) permettrait de prendre en compte tous les impacts et d'assurer ainsi une comparaison plus juste entre les deux cas.¹⁰

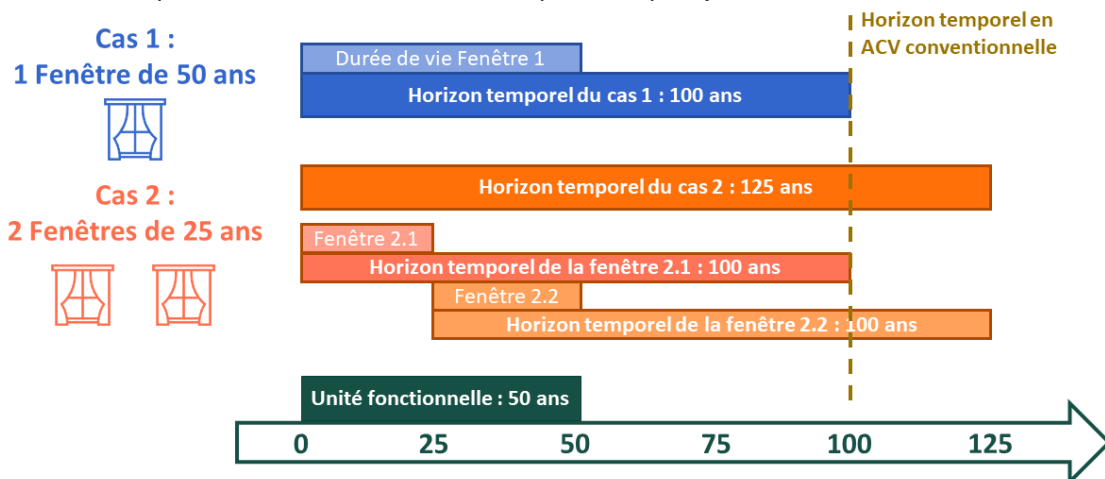


Figure 4 - Schéma représentant la gestion des horizons temporels en cas d'émissions décalées dans le temps au moyen d'un exemple constituant de fenêtre de durées de vie différentes.

Note : dans cet exemple, l'HT considéré est resté établi à 100 ans, mais on pourrait choisir d'autres HT qui pourraient avoir d'autres effets.

¹⁰ Le choix de ne pas considérer un horizon temporel à 125 ans est délibéré. En effet, cet horizon temporel est bien trop spécifique au cas pratique en question. L'ACV dynamique ne doit pas engendrer la création d'une multitude de nouveaux indicateurs. C'est pourquoi, nous recommandons de considérer les horizons temporels restreints à 20, 50, 100, 500 et 1000 ans, sur base des travaux de (Joos, et al. 2013), et de laisser le choix au praticien de choisir l'horizon temporel le plus adapté à son cas d'étude.

2.3.2 Projection dans le futur et ACV prospective

Il est courant de confondre ACV **prospective** et ACV **dynamique**. Bien que liés, les deux concepts ne sont pas exactement les mêmes.

En réalité, **l'ACV prospective est une sous-catégorie de l'ACV dynamique** dans laquelle on considère les modifications d'un système dans le futur. En prospectif, on considère exclusivement ce qui se passe à un moment instantané dans un futur défini, généralement en établissant des scénarios.

En dynamique, on y inclut le passé, les différents moments dans le temps ainsi que le comportement temporel intrinsèque des systèmes (ex. le carbone stocké dans les arbres de la plantation à la récolte). En d'autres termes, l'ACV dynamique a potentiellement besoin de prospectif, mais pas inversement.

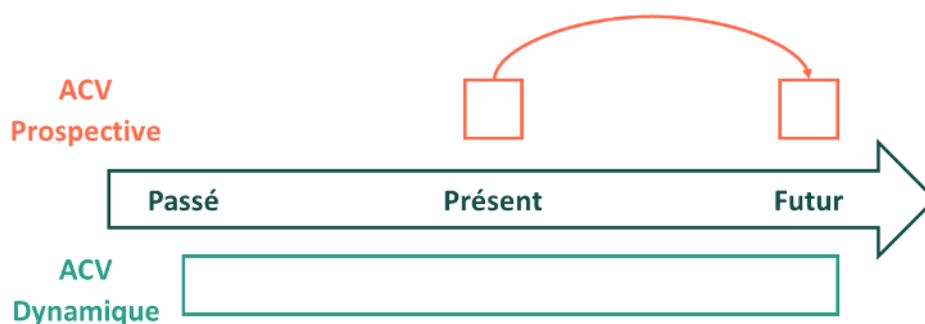


Figure 5 - Représentation schématique de la différence entre ACV prospective et ACV dynamique.

2.3.3 Dynamisme à différents niveaux

L'ACV dynamique peut nécessiter la mise en œuvre de plusieurs approches dynamiques de manière simultanée, tant au niveau des procédés d'inventaires qu'au niveau des facteurs de caractérisation.

Par exemple, le stockage de matériaux critiques n'est pas considéré aujourd'hui en ACV. Supposons que des réserves de cuivre soient estimées finies dans les 40 prochaines années, et que l'on stocke du cuivre dans des bâtiments d'une durée de vie de 100 ans. Dans cette situation, l'ACV ne reflète pas la criticité du cuivre dans 40 ans de manière appropriée, étant donné que l'on attribue les bénéfices du recyclage en fin de vie au temps t_0 de construction. De plus, personne ne sait quelles évolutions auront eu lieu dans la production de matière vierge et de ce fait de la façon de considérer les bénéfices liés à cette production évitée lors du recyclage en fin de vie des bâtiments : il est possible que les procédés soient plus performants et donc aient moins d'impacts sur l'environnement. Le risque de cette approche est donc de maximiser les bénéfices du recyclage en les prenant en compte dès aujourd'hui. Il conviendrait donc plutôt d'avoir une approche conservatrice sur le recyclage en atténuant les bénéfices si on n'est pas certain de savoir comment la production évoluera.

Cet exemple illustre bien le fait que l'ACV dynamique peut nécessiter la mise en œuvre de plusieurs approches dynamiques de manière simultanée. En effet, on y traite :

- de la question du décalage dans le temps de l'accessibilité à certaines ressources ;
- du prospectif en évaluant l'évolution des procédés de production de matière vierge ;
- de la variabilité du caractère critique d'un matériau dans plusieurs dizaines d'années qui est plutôt lié aux facteurs de caractérisation.

2.3.4 Synthèse des typologies et enjeux clés

La Figure 6 reprend les différentes approches dynamiques susceptibles d'être mises en place dans une ACV dynamique et les classe selon les acteurs susceptibles d'intervenir.

On observe que le **praticien de l'ACV** ne peut pas directement appliquer du dynamique sur l'ensemble de son ACV car certains aspects sont propres aux développeurs des données (au niveau des flux élémentaires primaires) ou aux éditeurs des modèles de caractérisation (au niveau des facteurs de caractérisation). Cependant, le praticien de l'ACV peut malgré tout engager une approche dynamique sur certains points tels que :

- La définition de l'unité fonctionnelle et de l'horizon temporel du cycle de vie
- Les données d'activité
- Les systèmes d'inventaire (*i.e.* choix de certains procédés unitaires et flux élémentaires primaires)
- Les facteurs de caractérisation, indirectement (c'est au praticien d'appliquer les FC dynamiques dans son ACV)

Enfin, il est important de noter que les **normalisateurs ont également leur rôle à jouer**. En effet, en intégrant des éléments de dynamique dans les normes, tous les acteurs sont incités à développer l'ACV dynamique à leur échelle.

De plus, **une collaboration entre acteurs est essentielle pour le développement de l'ACV dynamique**. Il n'est pas d'une grande utilité d'avoir des données dynamiques sans FC dynamiques, et inversement.

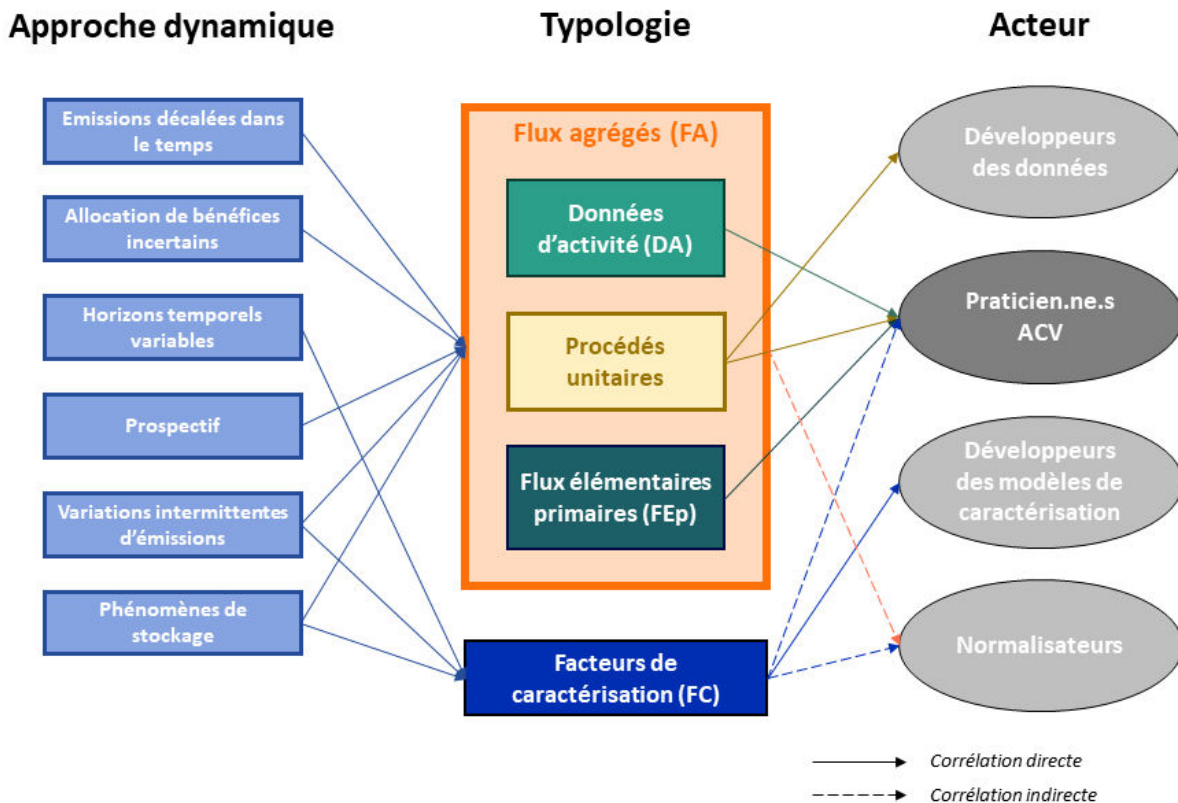


Figure 6 - Synthèse des approches dynamiques classées par typologie et acteur.

2.4 Cas d'utilisation de l'approche dynamique

Dans l'idéal, on pourrait considérer qu'il faille toujours suivre une approche dynamique en ACV pour tout produit, tout secteur, tout type d'ACV et toute catégorie d'impact.

Cependant, comme cette approche est plus laborieuse que l'approche conventionnelle – elle-même déjà laborieuse – les cas d'utilisations d'ACV dynamique les plus pertinents sont listés ci-dessous selon différents critères, à savoir :

- Par type de secteur
- Par type de catégorie d'impact
- Par type d'ACV

2.4.1 Type de secteurs pertinents pour l'approche dynamique

Le secteur du **bâtiment** est le secteur le plus souvent cité spontanément par les chercheurs en ACV dynamique car les longues durées de vie des bâtiments impliquent des enjeux temporels affectant les résultats de manière significative. (Su, et al. 2021) Certains enjeux d'horizons temporels ont été présentés en chapitre 2.3.1 pour ce secteur.

Les bâtiments impliquent une **immobilisation de ressources** pendant plusieurs dizaines d'années, ce qui est plutôt favorable pour les matériaux comme du bois en termes de stockage de carbone, mais plutôt défavorable pour des matériaux critiques comme le cuivre, dont la disponibilité est à rechercher. De plus, l'enjeu d'allouer les **bénéfices du recyclage** à l'instant t_0 de construction du bâtiment en ACV conventionnelle pour des longues durées de vie des bâtiments est souvent remis en question : il existe un risque de surestimation de ces bénéfices (qui n'interviendront que dans de nombreuses années). Enfin, la quantification des bénéfices environnementaux liés à l'évitement de la matière vierge sont difficiles à évaluer en raison de **l'incertitude de l'évolution des procédés** de production dans le futur.

Certains de ces éléments ont été pris en partie en compte dans la réglementation du bâtiment (RE 2020) en France.¹¹

Le secteur de **l'énergie** est également souvent cité par les chercheurs en ACV dynamique, notamment au niveau des impacts liés à l'utilisation des **énergies renouvelables**.

Par exemple, les impacts diffèrent si on considère l'utilisation d'électricité issue de panneaux photovoltaïques **en fonction des moments de la journée ou des saisons**. Ces éléments sont également souvent discutés dans les ACV de data centers dont le bilan peut être optimisé en fonction de l'identification des moments les plus pertinents (les moins impactants) pour lancer des calculs dans la journée.

Les mix électriques sont également concernés par une variabilité temporelle à considérer à deux niveaux : d'une part en termes **prospectifs** (le mix électrique évolue d'année en année et est supposé devenir de plus en plus vert à l'avenir) ; d'autre part en termes de **variations journalières** (le mix électrique d'un pays peut varier fortement d'heure en heure). Ces éléments sont souvent discutés dans les secteurs comme la **mobilité électrique** ou la **production d'hydrogène**. En effet, l'origine de l'hydrogène peut fortement varier au cours de la journée et être tantôt vert en cas d'excès d'électricité renouvelable (si beaucoup de soleil ou de vent) ou tantôt gris (si produit à partir d'énergies fossiles).

La **foresterie** est aussi propice à de l'ACV Dynamique au vu de la durée des cycles de croissance du bois, en particulier en lien avec la notion de stockage/déstockage de carbone. En effet, en ACV conventionnelle, lorsqu'on considère la coupe d'un arbre, on peut considérer que le stockage de carbone a eu lieu avant la coupe, ou après si on considère qu'un arbre a été replanté (gestion durable des forêts). Les deux options sont envisageables, selon certains critères explicités au chapitre 2.5.5. Il n'en reste pas moins que le cycle de

¹¹ La réglementation environnementale RE2020 est présentée de manière synthétique en chapitre 8.1 et est discutée plus tard dans le présent rapport.

régénération d'une forêt va de 20 ans à plusieurs centaines d'années, et que par conséquent, considérer tout le stockage à l'instant t_0 de la coupe du bois en ACV conventionnelle est problématique.

De même, pour les **matières biosourcées de façon générale**, on fait face à une confrontation entre la dynamique du système de production vs. la dynamique de l'environnement (capacité de renouveler ses ressources).

Il est donc fondamental d'intégrer du dynamique dans ce secteur, ce qui n'est pas suffisamment réalisé à l'heure actuelle. En outre, l'ACV dynamique permet de considérer la séquestration de carbone dans les impacts d'un produit à longue durée de vie, et le séquençement du stockage/déstockage de carbone pour ce genre de produits.

Enfin, l'**enfouissement** en fin de vie nécessiterait des approches dynamiques en ACV, notamment pour les effets de lixiviation. La lixiviation est le processus par lequel des substances solubles sont émises à partir d'un matériau, typiquement des déchets enfouis, en raison de l'infiltration de l'eau. En ACV, considérer la lixiviation est crucial car elle peut influencer la qualité des sols, des eaux souterraines et des écosystèmes avoisinants. La lixiviation étant un processus lent, elle nécessite une évaluation dynamique pour comprendre comment les émissions évoluent avec le temps et comment elles peuvent influencer les écosystèmes au fil des ans.

La Figure 7 synthétise les éléments abordés et associe les secteurs mentionnés aux approches citées précédemment.

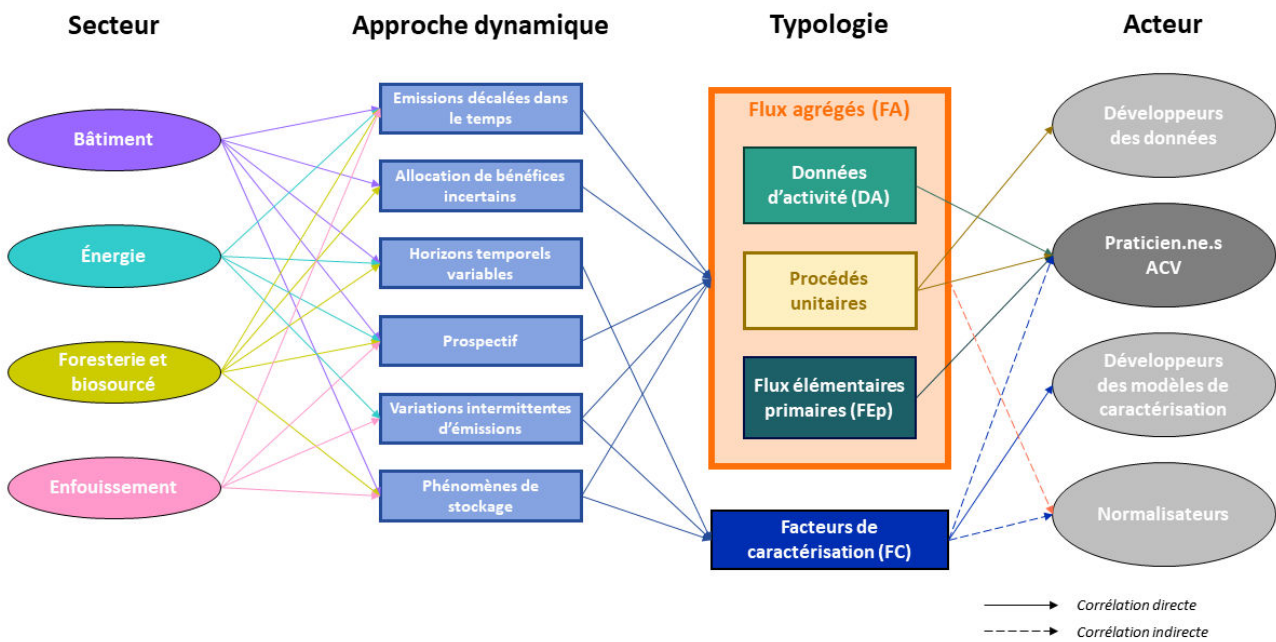


Figure 7 - Synthèse des principales approches les plus souvent citées par les chercheurs en ACV dynamiques pour les différents secteurs.

2.4.2 Type de catégories d'impact pertinentes pour l'approche dynamique

Chaque catégorie d'impact possède des variabilités temporelles intrinsèques qui peuvent être étudiées par l'ACV dynamique de différentes façons.

Pour rappel, l'objectif de cette étude est de couvrir différentes catégories d'impact, sans se focaliser exclusivement sur le changement climatique qui a été nettement plus étudié dans la littérature, notamment dans une série d'autres études pour ScoreLCA¹².

Changement climatique

En ce qui concerne le changement climatique, certaines variabilités temporelles ont déjà été abordées en section 2.3.1 et notamment :

- Le choix d'un **horizon temporel à 100 ans** fixé par le modèle de caractérisation le plus couramment utilisé, *i.e.* IPCC 2021
- La gestion des **émissions décalées** dans le temps
- La prise en compte de **stockage** de carbone dans des matériaux biosourcés

De manière plus spécifique au changement climatique, l'unité du « **CO₂ équivalent** » est souvent contestée en ACV dynamique. Premièrement, convertir les émissions de tous les gaz à effet de serre en cette unité ne rend pas compte du fait que les gaz à effet de serre ont des contributions variables dans le temps avec des évolutions différentes. Or, cette variation est majeure, comme l'illustre la Figure 8 représentant le forçage radiatif résiduel de plusieurs GES dans le temps. Pour rappel, le forçage radiatif d'un gaz représente son Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) ou, autrement dit, sa contribution « instantanée » à l'effet de serre. Par exemple, le CH₄ a une durée de vie atmosphérique moyenne de 11,8 ans alors que 1000 ans après une émission de CO₂, il en reste toujours plus de 20% dans l'atmosphère. Ainsi, on observe que la molécule de méthane (CH₄, en jaune) a un forçage radiatif résiduel qui décroît beaucoup plus vite que celui du CO₂ (en bleu) : après 100 ans, le forçage radiatif du CH₄ tend vers 0, alors que celui du CO₂ reste significatif.

En conclusion, considérer un facteur de conversion constant sur 100 ans pour convertir les émissions de CH₄ en émission de CO₂-équivalents ne reflète pas la dynamique réelle de la contribution du CH₄ à l'effet de serre. Le méthane contribue nettement plus à l'effet de serre que le CO₂ à court terme, et le CO₂ contribue à l'effet de serre sur une période nettement plus longue que 100 ans.

En ACV dynamique, on pourrait développer des FC annuels plus représentatifs de la cinétique décrite en Figure 8 afin de discuter des résultats selon un horizon temporel de 30, 50, 100 ou 1000 ans.

¹² Il s'agit notamment de l'étude 2015-01 réalisée par (Alexandre and Bagard 2016).

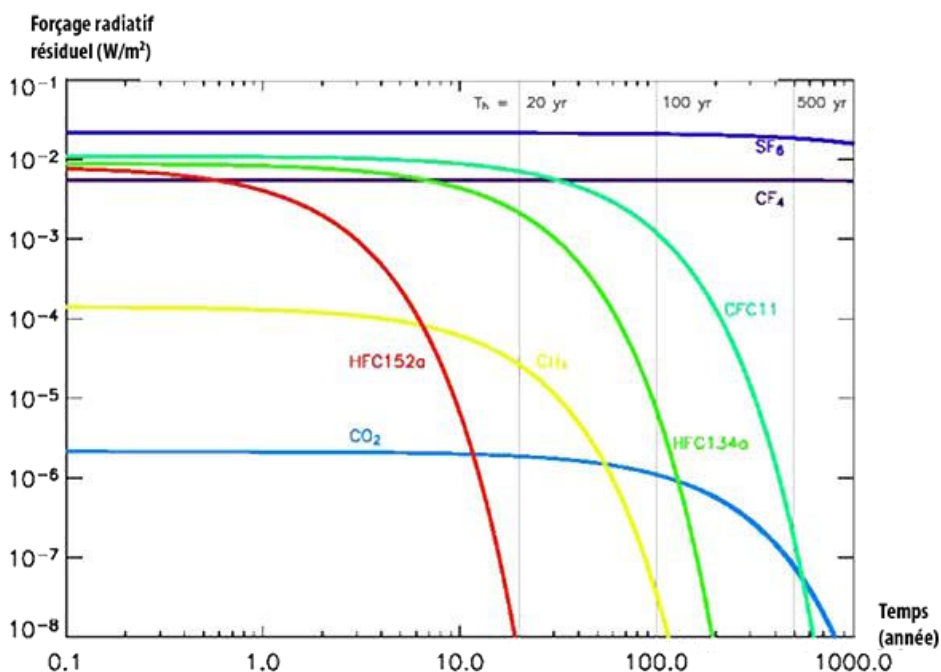


Figure 8 - Contribution au changement global de température d'une tonne de GES – méthane (CH₄) en jaune et dioxyde de carbone (CO₂) en bleu clair – en fonction de l'année après émission, issu de (Jancovici 2007).

Deuxièmement, l'utilisation de l'unité CO₂-équivalent en ACV dynamique apporte de la **confusion** dans l'interprétation des résultats. En effet, des impacts mesurés en ACV dynamique et exprimés en CO₂-eq ne peuvent être comparés avec des résultats en CO₂-eq calculés en ACV conventionnelle (*i.e.*, statique). Les deux unités ne reflètent en réalité pas les mêmes effets. Cela reviendrait à comparer des CO₂-eq à horizon temporel de 20 et 100 ans par exemple. Une solution serait d'exprimer les résultats pour cet indicateur en « CO₂ équivalent dynamique » par exemple, afin d'éviter toute comparaison entre les deux approches.

Notons que l'ACV dynamique permet d'obtenir des résultats en indicateurs absolus et non relatif à 1kg de CO₂. Pour ce faire, il est possible d'utiliser le PRG absolu (AGWP en anglais) en W/m² et le Pouvoir de Changement de Température (PCT) absolu (AGTP en anglais) en °C. (Zieger, Lecompte and Hellouin de Menibus 2020)

Enfin, la prise en compte des bénéfices d'actions de **compensation carbone** devrait être plus nuancée au moyen d'approches temporelles telles que proposées par l'ACV dynamique. Aujourd'hui, la solution des entreprises face à des émissions résiduelles (après réduction de celles-ci) est régulièrement d'annoncer la compensation de leurs émissions indiquant un chemin vers la neutralité carbone. Cependant, il est incorrect de compenser une émission d'aujourd'hui avec la plantation d'un arbre qui doit encore croître pour compenser cette émission dans un futur lointain (plusieurs dizaines d'années). De plus, il existe une incertitude trop grande quant à l'intégrité des arbres et forêts plantés à long terme pour pouvoir garantir la compensation. Un système assurantiel devrait être considéré pour éviter d'annoncer une neutralité carbone en s'attribuant aujourd'hui des bénéfices futurs.

Il est donc préférable d'utiliser l'ACV dynamique afin d'identifier les activités trop émissives à cesser progressivement plutôt qu'à compenser ces mêmes activités émissives.

Toxicité

Les conséquences de la toxicité sont associées aux propriétés de la substance toxique (qu'elle soit aiguë ou cumulative, radioactive, etc.), aux caractéristiques des organismes vivants exposés (leur sensibilité, le seuil d'effet, la proportionnalité ou non, les éventuels effets synergiques et antagonistes), ainsi qu'aux conditions d'exposition (durée, concentration, cocktails). Lors de l'évaluation des impacts toxiques d'un produit ou d'une activité, il est recommandé d'examiner ces trois effets dans le contexte d'une analyse dynamique. En effet :

- Avec le temps, la **substance peut subir des changements** de propriétés via, par exemple, des réactions chimiques, des dégradations ou un inertage, la rendant généralement moins toxique, ou plus rarement plus toxique, comme dans le cas du passage du chrome III au chrome VI (Sharma, et al. 2022).
- Avec le temps, il est possible de présumer que les **organismes vivants restent plus ou moins stables** ; il se peut que l'évolution génétique des espèces à courte durée de vie les rende plus résistantes aux expositions à des substances toxiques. Cependant, cet effet dynamique est probablement relativement faible et difficile à modéliser.
- Avec le temps, les **caractéristiques de l'exposition subiront des changements** : dilution avec réduction des effets non proportionnelle, mise en place d'actions préventives si le risque est connu (par exemple, gestion des déchets radioactifs, traitement thermique des substances dont le danger découle de leur structure moléculaire) pour limiter l'exposition, et relargage dans un milieu peu sensible.

Les approches actuelles pour mesurer la toxicité en ACV tendent à supposer des conditions temporelles constantes et des horizons infinis, comme présenté en section 2.3.1. C'est notamment le cas du modèle USEtox, développé par (Fantke, Bijster, et al. 2017), recommandé par la Commission Européenne et le plus utilisé pour évaluer les impacts liés à la toxicité en ACV à l'heure actuelle. Le GLAM¹³ souligne que ces enjeux d'horizons temporels définis présentent une limitation, car les métaux exercent une influence trop significative dans les modèles de caractérisation en raison de leur stabilité au fil du temps (Owsianiak, et al. 2023). Or, cela néglige des substances potentiellement très toxiques à court terme, comme évoqué en chapitre 2.3.1.

USEtox explore néanmoins, dans sa version 3.0, l'introduction de différents horizons temporels. De plus, (Shimako, Tiruta-Barna and Bisinella de Faria, et al. 2018) ont montré que les indicateurs de toxicité sont particulièrement sensibles aux éléments temporels pris en compte lors de l'établissement des ICV. Ils suggèrent en particulier de définir l'horizon temporel à une échelle journalière. Il existe un modèle test, non-opérationnel, basé sur Usetox, permettant de prendre en compte le dynamique au niveau de la toxicité (Shimako, Tiruta-Barna and Ahmadi, Operational integration of time dependent toxicity impact category in dynamic LCA 2017).

Il est important de noter que, bien que la considération de cette dimension temporelle soit importante lors de l'évaluation de la toxicité (envers l'Homme ou la biodiversité), cet indicateur a la particularité d'être influencé par un grand nombre d'autres paramètres. Par exemple, la toxicité humaine peut fortement varier selon la probabilité que l'humain y soit exposé. Dans ce cas, il est essentiel de développer des données ou méthodes de caractérisation capables de faire la distinction sur les milieux d'émission (par exemple entre zone urbaine ou rurale), plutôt qu'entre horizons temporels. L'ACV étant, par définition, une modélisation et donc une simplification du système étudié, il est important de se focaliser en priorité sur les éléments qui influencent le plus les résultats.

Epuisement des ressources

Les ressources minérales ne s'épuisent pas au sens strict de disparition. Il n'y a pas de perte de matière mais leur accessibilité varie en raison de leur dispersion ou de leur stockage dans la technosphère¹⁴ ou dans les déchets. La gestion de cette variation de l'accessibilité dépend de deux éléments :

- L'horizon temporel considéré, car les technologies évoluent et permettent parfois d'accéder à des ressources inaccessibles actuellement

¹³ Le GLAM (Global Guidance on Environmental Life Cycle Impact Assessment Indicators) est un projet de l'UNEP-SETAC qui vise à renforcer le consensus mondial sur les indicateurs ACV.

¹⁴ La « technosphère » englobe toutes les activités et produits humains liés à la production, transformation et consommation. On définit également le terme « écosphère » qui se réfère principalement à l'environnement naturel. En quelque sorte, l'écosphère englobe la technosphère, servant à la fois de source de matières premières et de réceptacle pour tous les déchets produits par la technosphère.

- Le coût relatif des matières secondaires par rapport aux matières premières.

Ainsi, pour les ressources qui ne seront pas épuisées au moment où une production peut être évitée grâce au recyclage, il n'y a pas de défi dynamique majeur. Cependant, certaines ressources finiront principalement dans la technosphère, comme le cuivre pour les câbles électriques par exemple. Dans ce cas, le défi consistera à gérer la pénurie de disponibilité de la ressource¹⁵.

L'approche dynamique en ACV pour l'épuisement des ressources concerne donc un nombre restreint de ressources et doit se concentrer sur deux aspects principaux :

- La date de l'utilisation de la ressource (ou de sa remise en disponibilité)
- L'ajustement des facteurs de caractérisation définis par ces méthodes pour refléter cette perte effective de disponibilité (en augmentant le facteur de manière significative).

D'une part, la prise en compte de la date d'utilisation de la ressource permettrait de mieux refléter la disponibilité d'une ressource dans le temps. Cela pourrait se faire au moyen d'inventaires dynamiques et permettrait, par exemple, de mieux visualiser quand une activité d'extraction pourrait avoir moins d'impact pour un matériau spécifique.

D'autre part, comme évoqué précédemment dans une autre étude ScoreLCA (De Caemel, Beylot and Huppertz 2022), il existe de nombreux modèles de caractérisation pour évaluer les impacts liés à l'épuisement des ressources minérales et métalliques en ACV. On peut les classer en 3 catégories :

- La méthode **ADP** (Abiotic resource Depletion Potential¹⁶) – développée par (van Oers, Guinée and Heijungs 2020) et recommandée par la Commission Européenne – est basée sur la quantité de chaque élément chimique présent dans la croûte terrestre. Appliquée aux minerais, elle donne des valeurs en équivalent kg antimoine (kg Sb eq.), appliquée aux énergies fossiles, elle donne des résultats en MJ. Avec la méthode **EDP** (Environmental Dissipation Potential¹⁷) développée par (van Oers, Guinée, et al. 2020), ces deux approches sont le plus couramment utilisées en ACV et se basent sur des données établies à un moment précis, sans considérer la perte associée à une non-disponibilité dans le futur.
- Les méthodes thermodynamiques qui évaluent le prélèvement de la ressource étudiée – souvent non-renouvelable – sans porter attention au stock disponibles. Elles ont l'avantage d'être scientifiquement robustes, avec comme unité le mégajoule (MJ). La méthode **CED** (Cumulative Energy Demand) cadrée par (Frischknecht, et al. 2015) mesure l'énergie primaire utilisée. La méthode **CExD** (Cumulative Exergy Demand) développée par (Boesch, et al. 2007) permet en plus d'obtenir des données sur l'usage d'autres ressources comme les minerais et l'eau. Ces deux méthodes sont implémentées dans une base de données comme Ecoinvent.
- La méthode **FWL** (Future Welfare Loss¹⁸) développée par (Huppertz, et al. 2019) permet de résoudre ce problème en prenant en compte la valeur monétaire de chacune des ressources. En effet, la méthode mesure la rareté d'une ressource au travers du coût de la ressource, actualisé pour limiter l'importance que les acteurs économiques attribuent au présent, et en considérant des coûts d'extraction constants. En d'autres termes, la méthode se base sur le ratio suivant :

$$FWL = \frac{\text{Quantité de ressources nécessaires}}{\text{Quantité de ressources disponibles}}$$

¹⁵ En envisageant des solutions telles que la substitution (ex. utilisation de l'aluminium à la place du cuivre), la réduction de l'utilisation (ex. moteurs moins puissants) ou l'exploration de nouvelles applications pour utiliser la ressource de manière plus valorisée.

¹⁶ Traduit comme « Potentiel de Déplétion des Ressources Abiotiques, Réserve Ultime ».

¹⁷ Traduit comme « Potentiel de Dissipation Environmental ».

¹⁸ Traduit comme « Perte Future de Bien-être ».

Bien qu'elle intègre des enjeux prospectifs à travers la prise en compte des générations futures, les FC publiés par la méthode FWL ne sont pas temporalisés pour permettre au praticien d'appliquer une approche dynamique.

En résumé, à l'heure actuelle, **il n'existe pas de méthode temporalisée pour évaluer l'impact lié aux ressources en ACV**. Appliquer une ACV dynamique pour cette catégorie d'impact n'apporte donc pas d'informations au niveau de la caractérisation des impacts, mais une spécification des flux élémentaires émis ou captés par année, par exemple au moyen d'un inventaire dynamique, apporterait des informations quant à la temporalité de l'activité et de la ressource associée.

Comme première étape, une liste des ressources concernées par le manque de disponibilité pourrait être établie afin de guider le praticien de l'ACV, par exemple à partir des 34 matières premières critiques établies par le Conseil Européen (Conseil Européen 2023).

Utilisation de l'eau

Les précipitations annuelles connaissent une augmentation de 9% en Belgique depuis le début de l'ère industrielle (Climat.be 2022). Les pluies se manifestent de manière plus intense et concentrée, entraînant une moindre pénétration dans les nappes phréatiques. Par ailleurs, le bassin méditerranéen est une des zones du monde qui va s'assécher le plus rapidement avec une diminution de 4% des précipitations terrestres par degré de réchauffement climatique. (MedECC 2020). Ainsi, le défi réside dans les problèmes de consommation croissante et de captation de l'eau.

La consommation d'eau ne pose pas de problème lorsque l'eau utilisée aurait de toute façon rejoint la mer par le biais des cours d'eau – sous réserve que ces cours d'eau disposent d'une quantité d'eau suffisante.

Le défi dynamique de la consommation d'eau réside dans la corrélation ou la décorrélation entre la période de consommation et les conditions météorologiques favorables ou défavorables. Une simplification possible de la modélisation de cet enjeu pourrait consister à l'analyser sous l'angle de la saisonnalité, avec une consommation potentiellement moins impactante en hiver, par exemple, comme illustré en Figure 1.

2.4.3 Critères pour décider de conduire une ACV dynamique

Idéalement, **toute ACV devrait être dynamique**. Dans les cas où, pour un même système, les résultats de l'ACV dynamique sont similaires avec ceux de l'ACV statique, alors on peut se contenter d'appliquer l'ACV statique. Cependant, comme la mise en place d'une ACV dynamique est plus fastidieuse, il convient de définir des critères ou seuils pour aider le praticien à savoir s'il faut engager une approche dynamique ou non.

Actuellement, il est difficile (voire impossible) de définir de tels seuils de manière quantitative. En effet, il manque de retours d'expérience suivant des cas d'application d'ACV dynamiques dans la littérature.

Néanmoins, il est possible de déterminer des critères qualitatifs permettant d'aider le praticien de l'ACV à savoir s'il faut lancer une approche dynamique ou non.

Il est recommandé d'engager une approche dynamique en ACV dans quatre cas :

5. Des systèmes qui varient dans le temps

Considérer la variation temporelle des systèmes étudiés en donnant de la variabilité aux données d'inventaires et d'activité utilisées. La comparaison entre une voiture électrique chargée exclusivement pendant le jour, en utilisant l'électricité générée par des panneaux photovoltaïques, et une voiture chargée indépendamment du moment de la journée illustre un cas où deux systèmes opèrent à des moments temporels distincts, avec des impacts différents.

6. Un aspect du cycle de vie particulièrement long (>5-10 ans).

Par exemple, un système avec une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (ex. bâtiments, utilisation de ressources biosourcées avec des renouvellements de biomasse longs de plusieurs dizaines d'années, autres systèmes de capture de carbone...).

Au-delà de **5 ans**, il est recommandé au praticien d'évaluer la pertinence d'engager une approche dynamique. Au-delà de **10 ans**, il est recommandé au praticien de systématiquement engager une approche dynamique.

7. Des impacts significatifs après le temps t_0 (>10%)

Si la quasi-totalité des impacts étudiés ont lieu entre les phases d'extraction et de mise en œuvre, une ACV statique aura des résultats similaires à une ACV dynamique et sera donc suffisante. Dans tout autre cas, il est plus judicieux de réaliser une ACV dynamique.

8. Des phénomènes environnementaux qui varient en fonction de la temporalité des émissions

Par exemple, pour certaines catégories d'impact comme la toxicité ou les radiations ionisantes dont les effets peuvent être influencés selon le moment de l'émission, comme discuté ci-dessus.

En résumé, la Figure 9 reprend les différents critères énoncés ci-dessus sous forme de logigramme. L'objectif est que le praticien applique ce logigramme à son cas d'étude en fonction des 4 questions posées en bleu.

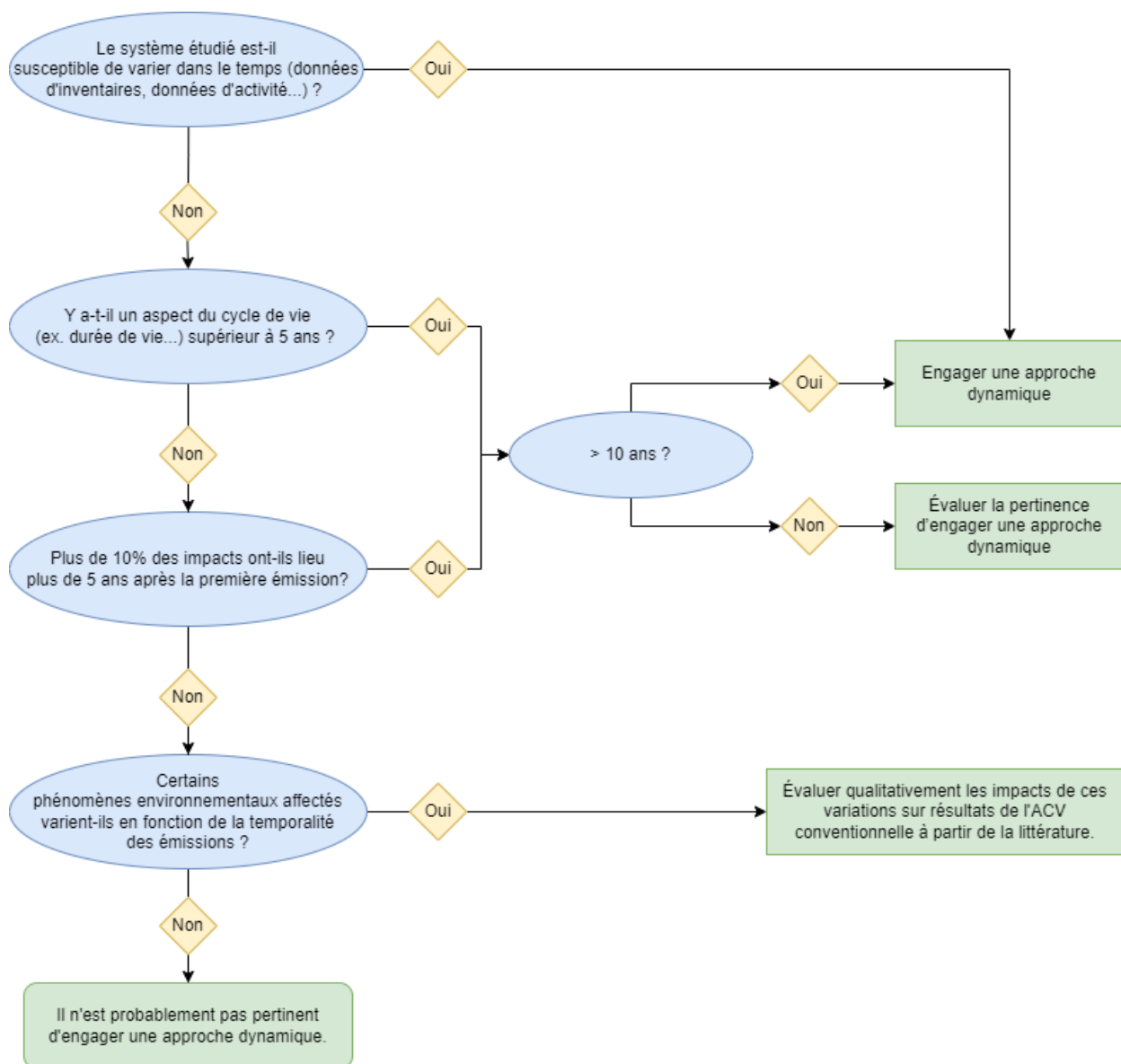


Figure 9 - Logigramme d'aide à la prise de décision sur l'approche dynamique en ACV.

2.4.4 Complémentarité avec l'ACV conséquentielle

L'ACV conséquentielle est définie par l'ADEME comme étant une :

*Quantification des impacts environnementaux résultant d'une **décision**, en analysant ses conséquences **directes et indirectes** par rapport à un scénario de référence.* (ADEME, et al. 2020)

Alors que l'ACV dynamique offre une **perspective temporelle** en examinant les variabilités des différentes étapes du cycle de vie, l'ACV conséquentielle va **au-delà en évaluant les implications à long terme** et les effets induits sur le monde qui nous entoure, à travers des mécanismes du marché. Cette approche plus globale permet d'appréhender les répercussions à plus grande échelle.

Les deux approches ne sont pas liées en tant que tel, mais il est plutôt recommandé de les appliquer selon la pertinence en fonction du cas d'étude. Il existe certains cas où il est recommandé de négliger les effets dynamiques, d'autres où l'on peut négliger les effets conséquentiels, et parfois à l'inverse, où les deux approches peuvent être combinées.

A titre illustratif, les enjeux liés à l'utilisation de l'eau sont généralement plutôt dynamiques que conséquentiels. Dans le cas d'une étude des impacts associés à des verres réutilisables pour festivals, il est important de prendre en compte le fait que ces verres seront essentiellement utilisés en été, quand les ressources en eau sont plus critiques (comme démontré en chapitre 2.1 et Figure 1). Ainsi, considérer une utilisation de l'eau de manière dynamique par mois et non par année permet une évaluation des impacts plus juste.

Dans d'autres cas, les deux approches peuvent apporter certaines nuances dans l'interprétation des résultats. C'est notamment le cas de l'utilisation de ressources biosourcées.

D'une part, le conséquentiel permet de nuancer les enjeux de déforestation liés à la production de biodiesel à partir de matières biosourcées. En effet, en France, une certaine partie du territoire est allouée à la production de blé. Si l'on décide de réaffecter ces sols à la production de colza pour produire du biodiesel « Made in France », comme la demande en blé reste identique, cette nouvelle production de colza va induire d'autres changements d'affectation des sols pour satisfaire la demande. Par ricochet, cette demande de terres pour cultiver du blé (voire l'importer en France) va impliquer de la déforestation hors de France pour subvenir au manque de disponibilités des sols. La production de biodiesel aura donc, indirectement, contribué à la déforestation. Il est donc nécessaire de prendre en compte l'approche conséquentielle.

D'autre part, le CO₂ émis lors de la combustion du biodiesel est biogénique. Or, l'ISO 14067 considère que l'impact associé est neutre étant donné que ce CO₂ émis a été stocké auparavant. Ce choix est discutable comme indiqué en section 2.5. L'ACV dynamique peut permettre de présenter ces éléments de stockage et d'émission de façon plus fine en fonction du temps. Ainsi, dans des études impliquant du la production de biosourcé, il est recommandé de suivre les deux approches, dynamiques et conséquentielles.

2.5 Risques de ne pas considérer l'ACV dynamique

Comme présenté dans les chapitres précédents, l'ACV telle qu'appliquée à l'heure actuelle ne présente pas toujours correctement les impacts environnementaux réels lorsque des variabilités temporelles doivent être prises en compte. Cela peut mener à surestimer ou sous-estimer certains effets, et donc à prendre des décisions qui vont à l'encontre du développement durable. Afin d'illustrer cette problématique, plusieurs exemples de risques sont présentés ci-dessous.

2.5.1 Risque de comparer des matériaux inégalement

L'ACV telle qu'appliquée aujourd'hui, a tendance à favoriser certains matériaux par rapport à d'autres.

En effet, il est coutume en ACV conventionnelle de ramener les impacts liés à la fin de vie au temps t_0 . Pour les bâtiments, la fin de vie a généralement lieu plusieurs dizaines d'années après la construction de celui-ci. Ainsi, pour des matériaux dont les étapes de production sont particulièrement importantes (ex. acier, béton...), **allouer les bénéfices liés au recyclage** de ces matériaux au temps t_0 de production contrebalance les impacts défavorables liés aux étapes de production. Inversement, pour des matériaux biosourcés (ex. le bois) dont les étapes de fin de vie (généralement de l'incinération) sont nettement plus impactantes que les étapes de production (croissance par stockage de CO₂), ramener les impacts de fin de vie au temps t_0 a pour effet d'obtenir *in fine* des résultats comparables entre les deux types matériaux.

Cette application ne considère pas le fait que le matériau biosourcé aura stocké du CO₂ pendant plusieurs dizaines d'années avant d'être incinéré. Si ce stockage est pris en compte, cela peut jouer en faveur du matériau biosourcé.

De plus, nul ne peut savoir **quelle production de matière vierge on évitera réellement** en fin de vie au bout de plusieurs dizaines d'années d'utilisation. D'ici-là, le procédé de production sera peut-être plus décarboné qu'à l'heure actuelle, rendu plus efficace... Cela peut alors mener à la prise de mauvaises décisions, comme discuté dans le chapitre suivant.

Ramener les impacts environnementaux de la fin de vie des matériaux au temps t_0 a donc pour effet de majorer les bénéfices du recyclage pour certains matériaux au détriment d'autres.

Dans ce cas de figure, l'ACV dynamique, lorsqu'appliquée de manière cohérente¹⁹, **permet de suivre une approche plus conservatrice envers les émissions** (éviter d'omettre les émissions futures) et sur le recyclage, en « atténuant » les bénéfices en cas d'incertitude (ne pas compter tous les bénéfices incertains de demain au temps t_0).

A cet exemple s'ajoutent les éléments abordés en section 2.3.1 portant sur **la gestion des émissions décalées dans le temps, des durées de vie de matériaux différentes et les phénomènes de stockage de matériaux** sur plusieurs dizaines d'années. Ces pratiques ont pour effet de favoriser inégalement certains matériaux, et l'ACV dynamique permet de régler cela au moyen de pratiques décrites par après.

2.5.2 Risque de mauvaises décisions liés à des choix prospectifs

Comme évoqué précédemment, la prise en compte de mix énergétiques futurs en ACV est une application de l'ACV dynamique et, en particulier, de l'ACV prospective. Cependant, ce choix peut mener à des résultats défavorables sur l'environnement.

Par exemple, dans le cadre d'une ACV dynamique pour le secteur du bâtiment, si l'on considère un mix électrique futur plus vert qu'aujourd'hui, les résultats pourraient encourager le secteur à ne pas sur-isoler à

¹⁹ Il convient d'appliquer l'ACV dynamique de manière juste et cohérente afin d'éviter d'autres incohérences au sein de l'application de l'approche dynamique. Cela a notamment été le cas dans le cadre de la RE2020 car les horizons temporels considérés ne correspondaient pas au décalage d'émissions dans le futur de manière appropriée, comme présenté en chapitre 2.3.1.

court-terme étant donné que les émissions liées au chauffage des bâtiments auront tendance à réduire dans le futur. Or, à court terme, réduire les consommations d'énergie et les émissions de CO₂ associées sont essentielles. Ainsi, telle qu'appliquée aujourd'hui, l'ACV n'inciterait pas à consommer moins.

Une solution serait donc de faire varier l'horizon temporel des FC à des temps plus courts afin de représenter l'urgence de réduire les impacts environnementaux liés aux chauffages des bâtiments.

2.5.3 Risque de négliger les effets de certaines molécules toxiques à très court terme

Comme explicité en chapitre 0 dans la présentation de l'indicateur de toxicité, les modèles de caractérisation actuelles sont établis sur des horizons temporels fixes. Cela a pour effet de négliger certaines substances très toxiques à court terme et de surestimer d'autres substances toxiques à long terme. L'approche dynamique permettrait alors d'interpréter ces résultats sur différents horizons temporels afin d'y voir plus clair.

2.5.4 Risque de manquer de recul sur les catégories d'impacts

Pour rappel, les facteurs de caractérisation permettent de traduire les flux élémentaires en une unité d'indicateur commune, et de les pondérer en fonction de leur contribution à cet indicateur. Les valeurs associées sont établies par des modèles de caractérisation qui tentent de modéliser les enjeux environnementaux associés, ce qui a pour effet d'induire une certaine simplification dans la modélisation.

Ces modèles de caractérisation doivent allier applicabilité à l'ACV et robustesse, ce qui implique parfois d'établir certains paramètres qui nécessitent d'être discutés lors de l'interprétation des résultats. C'est notamment le cas des horizons temporels définis par les modèles de caractérisation et, en particulier, de l'horizon temporel fixé à 100 ans par le modèle IPCC 2021 pour mesurer les impacts sur le changement climatique. Comme évoqué précédemment, engager une approche dynamique en ACV permet de discuter des impacts environnementaux mesurés sur différents horizons temporels (20, 50, 100, 500, 1000 ans). (Joos, et al. 2013)

2.5.5 Risque de considérer la compensation comme un bénéfice immédiat vers la neutralité carbone

A l'heure actuelle en ACV pour le changement climatique, après avoir établi des stratégies de réduction d'émissions, il est courant d'annoncer la compensation des émissions résiduelles au moyen de plantations d'arbres pour justifier un chemin vers la neutralité carbone. Cependant, compenser une émission aujourd'hui avec la plantation d'un arbre qui doit encore croître pendant plusieurs dizaines d'années s'apparente fortement à du greenwashing.

En effet, l'incertitude quant à l'intégrité à long terme des arbres et des forêts plantés rend difficile la garantie de la compensation. Cette pratique est similaire à l'allocation des bénéfices du recyclage au temps t_0 évoqué plus haut dans ce chapitre. Il serait plus prudent de considérer un système assurantiel, sur base d'ACV dynamique, pour éviter de revendiquer une neutralité carbone aujourd'hui en anticipant des avantages futurs incertains.

En particulier pour le secteur forestier, le choix de l'allocation du stockage de carbone doit être lié à la période de décision :

- Si la forêt n'a pas été plantée en vue de l'exploitation, le fait de couper un arbre va permettre à un autre de repousser et donc la captation induite par la libération d'une surface se fait en aval temporel de la coupe

- Si la forêt a été plantée à dessein pour l'exploitation, la captation passée doit être attribuée à l'utilisateur et la captation post coupe à l'exploitant futur. C'est vraisemblablement le cas majoritaire car on commence peu de nouvelles exploitations.

En complément, il est important de noter que, à dire d'experts ACV dans le domaine, la séquestration de carbone dépend du type de forêt. Par exemple, une forêt boréale capte du carbone dans le sol étant donné les conditions climatiques plus froides, alors qu'en forêt tropicale, le sol est très pauvre en carbone.

2.5.6 Risque d'accumulation d'émissions liée à une prise de décision tardive

Dans des cadres décisionnels, tant pour les organisations publiques que pour les entreprises privées, il est coutume de fixer des objectifs de réduction des émissions d'ici 2030 ou 2050 et de communiquer ceux-ci, par exemple à travers les objectifs SBTi (Science Based Targets initiative).

Malgré sa nécessité pour stimuler les organisations à diminuer leurs émissions, cette pratique possède deux limites majeures. Premièrement, elle ne tient pas compte du risque de ne pas atteindre ces objectifs dans le futur, ce qui peut conduire certaines organisations à surestimer (intentionnellement ou non) la faisabilité de leurs mesures de réduction lors de la déclaration initiale.

Deuxièmement, cette pratique ne tient pas compte des enjeux dynamiques entre la déclaration et la mise en œuvre des mesures de réductions des émissions. En effet, plus une mesure de réduction d'émissions prend du temps à être mise en place, plus la situation initiale continue d'émettre, ce qui peut entraîner une accumulation significative des émissions.

Cette deuxième limite est représentée dans la **Figure 10**. Les deux scénarios partent du même niveau d'émissions en 2024 et atteignent hypothétiquement le même objectif de réduction d'émissions en 2050. Cependant, les actions de réduction d'émissions du scénario 1 ont été mises en œuvre tôt après la décision et de manière graduelle, alors que celles du scénario 2 ont été mises en place plus tard et de manière plus concentrée.

La différence entre ces deux scénarios est représentée par la zone grise qui correspond à l'accumulation d'émissions du scénario 2 par rapport au 1 qui découlent de la prise de décision tardive. Certes, les deux scénarios atteignent le même objectif en 2050, mais la dynamique entre la prise de décision et la finalité n'est pas la même, ce qui a souvent tendance à être négligé dans les évaluations environnementales conventionnelles.

L'ACV dynamique permet de comparer les deux scénarios de manière plus juste en regardant les différences année par année plutôt qu'uniquement en 2050 de manière prospective.

Notons également que l'on se focalise uniquement sur les effets environnementaux dans cet exemple mais que les conclusions s'étendent aux impacts sociaux et économiques. En effet, il est nettement préférable d'adopter des mesures de réductions d'émissions de manière graduelle (scénario 1) plutôt que de manière condensée (scénario 2) car cela laisse le temps à la société de s'adapter aux mesures.

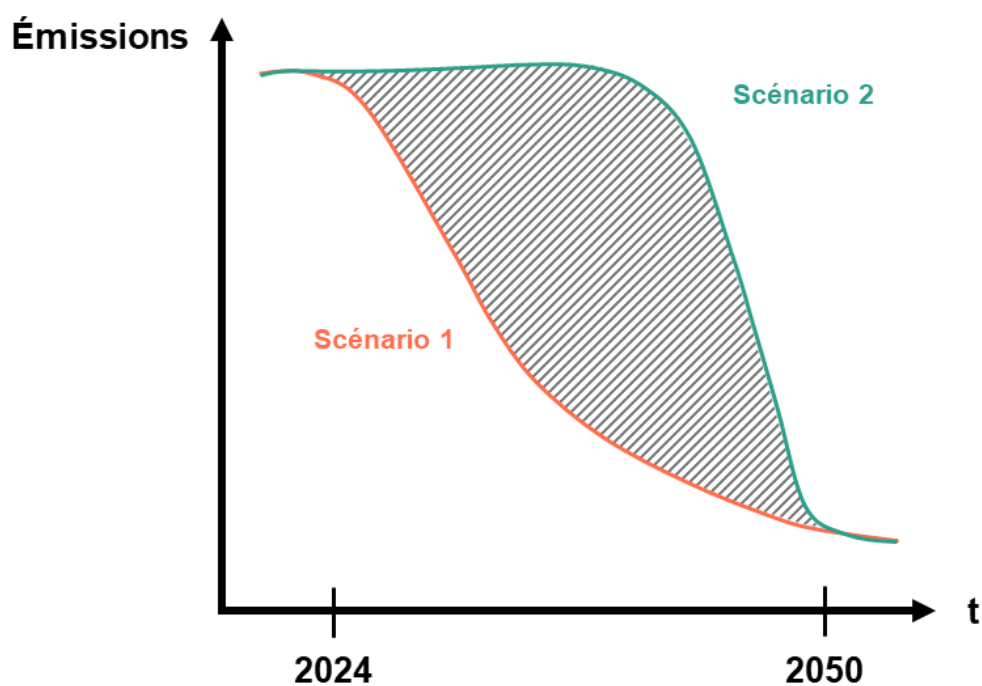


Figure 10 – Représentation de deux scénarios qui ont les même objectifs de réduction d'émissions mais pas les mêmes effets temporels. La zone hachurée représente la différences d'émissions entre les deux scénarios.

3 Comment pratiquer l'ACV dynamique ?

Comme évoqué en introduction, toute ACV devrait être dynamique à tous les niveaux jugés pertinents²⁰. Cependant, cela n'est pas toujours réalisable pour le praticien car certaines approches nécessitent des actions de la part d'autres acteurs de l'ACV (éditeurs des modèles de caractérisation, développeurs des données...), et d'autres approches ne sont pas encore suffisamment développées méthodologiquement pour pouvoir être appliquées telles quelles.

Ainsi, l'objectif de ce troisième chapitre est de présenter les actions accessibles aux praticiens de l'ACV pour engager une approche dynamique en ACV. Au total, 10 actions sont synthétisées sous forme de fiches techniques et classées selon les cinq étapes de réalisation d'une ACV, à savoir :

1. Cadrage de modélisation
2. Collecte des données
3. Construction des inventaires
4. Caractérisation des impacts
5. Interprétation des résultats

Il est important de noter qu'appliquer l'ACV Dynamique ne revient pas à appliquer une seule des 10 fiches techniques présentées ci-dessous. Les fiches sont présentées ainsi afin d'aider le praticien dans la mise en œuvre des différentes approches, mais celles-ci ne sont pertinentes que lorsque plusieurs actions liées entre elles sont appliquées, comme indiqué dans les fiches-mêmes. Il revient donc au praticien de l'ACV de juger de la pertinence d'engager chacune des 10 approches.



Figure 11 - Les cinq étapes de réalisation d'une ACV qui peuvent être rendues dynamiques par une ou plusieurs pratiques.

Les 10 fiches techniques portant chacune sur une approche dynamique sont accompagnées d'une note complémentaire et sont listées par selon les cinq étapes de réalisation d'une ACV de la manière suivante :

1. Cadrage de modélisation
 - Fiche n°1 - Positionner les émissions dans le temps
 - Fiche n°2 - Considérer un horizon temporel commun pour la comparaison de systèmes
 - Fiche n°3 - Définir des scénarios prospectifs
2. Collecte de données
 - Fiche n°4 - Faire varier les données d'activité
 - Fiche n°5 - Faire varier les flux élémentaires primaires
3. Construction des inventaires
 - Fiche n°6 - Faire varier les procédés d'arrière-plan
4. Caractérisation des impacts
 - Fiche n°7 - Considérer des horizons de temps adaptés
 - Fiche n°8 - Utiliser des facteurs de caractérisation permettant de prendre en compte la variabilité de l'impact au cours du temps
5. Interprétation des résultats

²⁰ Les différents niveaux étant représentés par les 4 typologies d'ACV dynamiques présentées dans le Tableau 1, à savoir au niveau des données d'activité, des procédés unitaires, des flux élémentaires primaires et des facteurs de caractérisation

- Fiche n°9 - Présentation des résultats dynamiques
- Fiche n°10 - Faire des analyses de sensibilité pour montrer l'importance à considérer le facteur temps

Les 10 fiches techniques suivent le modèle présenté en Figure 12, contenant les informations suivantes :

- La **bannière du haut** présente le nom de l'action à pratiquer participant à la dynamisation, ainsi que l'étape de l'ACV (cf. Figure 11) et la typologie d'ACV dynamique (cf. Tableau 1) auxquelles la fiche technique est associée.
- La **colonne de gauche** reprend une description succincte de l'approche, un ou plusieurs exemples représentatifs et les autres fiches liées.
- La **colonne centrale** reprend les enjeux associés à cette approche dynamique, les actions concrètes à mener par le praticien de l'ACV, les données à collecter pour l'application de l'approche dynamique, les cas pertinents pour lesquels il est recommandé d'appliquer cette approche, ainsi que les catégories d'impact généralement affectées par cette approche dynamique.
- La **colonne de droite** classe le niveau de développement conceptuel de l'approche (*i.e.*, la maturité de la méthode), l'acceptabilité par la communauté scientifique et l'opérationnalisation (*i.e.*, à quel point l'approche peut être appliquée aujourd'hui par le praticien) de l'approche en question, sur une échelle de 0 (faible) à 5 (élevé). Ces appréciations sont basées sur différents entretiens effectués avec des experts scientifiques lors de la réalisation de l'étude, ainsi que sur base des travaux de (Beloin-Saint-Pierre, et al. 2020).
 - Le niveau de développement indique à quel point la pratique est appliquée en ACV aujourd'hui. Par exemple, un score de 1/5 indique que l'approche est encore au stade théorique, et un score de 5/5 indique que l'approche est souvent mise en œuvre par les praticiens de l'ACV.
 - L'acceptabilité scientifique désigne le degré d'acceptation de l'approche par la communauté scientifique (praticiens et chercheurs en ACV). Un score de 3/5 représente une acceptabilité neutre.
 - L'opérationnalisation indique la faisabilité de mise en œuvre de l'approche en comprenant le temps de mise en œuvre (notamment en fonction du développement des outils ACV actuels), le niveau d'expertise nécessaire et les besoins en données supplémentaires encore peu accessibles.
- La **bannière du bas** reprend les avantages, limites et éventuels besoins complémentaires pour améliorer la mise en œuvre de l'approche associée.

Nom de l'approche dynamique						Flux agrégés (FA)		
	Données d'activité		Procédés unitaires	Flux élémentaires primaires	Facteurs de caractérisation			
<u>Description de l'approche</u>	<u>Quel enjeu ?</u>					<u>Niveau de développement</u> faible ● ● ● ● ● élevé		
	<u>Action pour le praticien ?</u>					<u>Acceptabilité scientifique</u> faible ● ● ● ● ● élevé		
	<u>Quelle collecte de données nécessaire ?</u>					<u>Opérationnalisation</u> faible ● ● ● ● ● élevé		
<u>Exemple</u>	<u>Pertinence dans quel cas ?</u>					<u>Catégories d'impact</u>		
<u>Avantages</u>		<u>Limites</u>			<u>Besoins complémentaires</u>			

Figure 12 - Modèle exemple des fiches techniques portant sur les approches dynamiques.

3.1 Lors du cadrage de modélisation

3.1.1 Fiche n°1 – Positionner les émissions dans le temps

Fiche n°1 – Positionner les émissions dans le temps							
<p>Description de l'approche</p> <p>Recenser les différents impacts et bénéfices générés par le système étudié et les positionner au moment réel de leur occurrence plutôt que de tout ramener au temps t0 (instant de la première émission)</p>		<p>Quel enjeu ?</p> <p>Éviter l'attribution d'impacts et/ou de bénéfices futurs et incertains au temps t₀ après émission qui conduit à une sur- ou sous-estimation des impacts</p>			<p>Niveau de développement</p> <p>faible ● ● ● ● ● élevé</p>		
<p>Exemple</p> <ul style="list-style-type: none"> Positionnement dans le temps des impacts de production et de recyclage des métaux utilisés dans un bâtiment d'une durée de vie de 100 ans Stockage et éventuelle compensation de carbone du bois utilisé dans une charpente pendant 50 ans 		<p>Action pour le praticien ?</p> <p>Positionner les impacts sur une échelle de temps représentative du cycle de vie du système étudié</p>			<p>Acceptabilité scientifique</p> <p>faible ● ● ● ● ● élevé</p>		
<p>Autres fiches techniques liées</p> <ul style="list-style-type: none"> Fiche n°9 - Présentation des résultats dynamiques 		<p>Quelle collecte de données nécessaire ?</p> <p>Identifier la temporalité des données (<i>moment des émissions et des captations, récurrence de certaines étapes...</i>) sur l'ensemble de la durée de vie du système</p>			<p>Opérationnalisation</p> <p>faible ● ● ● ● ● élevé</p>		
		<p>Pertinence dans quel cas ?</p> <ul style="list-style-type: none"> Durée de vie longue (>5 ans) Écart long (>5 ans) entre le 1^{er} et dernier moment d'émission 		<p>Catégories d'impact</p> <p>Changement climatique, Ressources</p>			
<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> Meilleure vision sur la dynamique du système étudié 		<p>Limites</p> <ul style="list-style-type: none"> Approche difficile à appliquer à l'ensemble du système donc nécessité de se focaliser en priorité sur les étapes les plus importantes Implémentation compliquée car il n'existe pas (assez) d'outils associé à cette approche 		<p>Besoins complémentaires</p> <ul style="list-style-type: none"> Adaptation des outils ACV pour permettre d'associer le positionnement temporel de ces impacts avec leur caractérisation Développement de bases de données intégrant ces notions pour les inventaires cradle-to-grave 			

Figure 13 - Fiche n°1 – Positionner les émissions dans le temps

Note complémentaire à la Fiche n°1 - Positionner les émissions dans le temps

- Exemples détaillés
 - Positionnement dans le temps des impacts de production et de recyclage des métaux utilisés dans un bâtiment d'une durée de vie de 100 ans

Le Tableau 3 reprend la description de l'instant t_0 sur la base duquel les autres étapes vont être positionnées dans le temps (ici, les émissions associées à la production des matériaux).

Ensuite, les autres émissions principales du cycle de vie sont reprises en mentionnant les années d'occurrence après cet instant t_0 . Les émissions associées au remplacement de certaines pièces métalliques de durée de vie inférieure à celle du bâtiment doivent également être prises en compte.

Tableau 3 - Exemple Fiche n°1 sur le positionnement des émissions dans le temps pour le bâtiment.

Instant t	Années après t_0	Description
t_0	0	Impacts de la production des métaux utilisés dans le bâtiment
t_1	1-2	Impacts de la mise en œuvre des métaux sur le chantier et de la gestion de certaines chutes de production
t_2	20, 40, 60 et 80	Impacts du remplacement de certains éléments métalliques pendant la durée de vie du bâtiment et de leur fin de vie (ex : visserie, portes...)
t_3	100	Impacts de la démolition et orientation des différents métaux vers les filières fin de vie, impacts du recyclage, évitement de la matière vierge associée

- Stockage et éventuelle compensation de carbone du bois utilisé dans une charpente pendant 50 ans.

Cet exemple est inspiré du risque de ne pas considérer l'ACV dynamique présenté au chapitre 2.5.5. En l'occurrence, comme présenté dans le Tableau 4 il est important de distinguer les phases de stockage de carbone pendant la croissance de l'arbre de l'incinération finale de la charpente en fin de vie du bâtiment. De plus, l'ACV dynamique permet de mettre en valeur le fait que ce carbone stocké dans la charpente est immobilisé pendant toute la durée de vie du bâtiment (ici 70 ans).

Tableau 4 - Exemple Fiche n°1 sur le stockage de carbone du bois utilisé dans une charpente.

Instant t	Années après t_0	Description
t_0	0	Plantation de l'arbre
t_1	1-30	Stockage de carbone pendant la croissance de l'arbre
t_2	30	Coupe et transformation du bois en charpente
t_3	30-100	Immobilisation du carbone stocké dans la charpente tout au long de la durée de vie du bâtiment
t_4	100	Incinération de la charpente en fin de vie du bâtiment

- Pertinence

La fiche indique que l'approche est pertinente dans le cas de **durées de vie longues, i.e., supérieures à 5 ans**. Néanmoins, la règle est plus subtile car, comme évoqué dans la section 0, il est recommandé au praticien de procéder en deux temps :

1. Au-delà de 5 ans, il est recommandé d'évaluer la pertinence d'engager une approche dynamique
2. Au-delà de 10 ans, il est recommandé d'engager systématiquement une approche.

Cette remarque s'applique à toutes les fiches concernées par une « durée de vie longue (5 ans) ».

Par ailleurs, spécifiquement pour cette fiche technique, il est recommandé au praticien de considérer l'écart entre la première et la dernière émission et, si cet écart est supérieur à 5 ou 10 ans, de suivre les conditions évoquées ci-dessus. Cette précision est importante, car, par exemple, dans le cas d'une mise en décharge d'un produit, les émissions liées à la lixiviation peuvent s'étaler sur des durées nettement plus longues que la durée de vie du produit mis en décharge.

- Opérationnalisation

L'évaluation de l'opérationnalisation de l'approche est décrite plus précisément dans le Tableau 5. Les notes sur 5 sont orientées « opérationnalisation ».

Tableau 5 – Description de l'opérationnalisation de la Fiche n°1 - Positionner les émissions dans le temps

Temps de mise en œuvre	Niveau d'expertise nécessaire	Besoins en données supplémentaires compliquées d'accès	Opérationnalisation
Moyen (3/5)	Faible (5/5)	Assez faible (4/5)	4/5

- Limites

Très peu d'outils ACV permettent l'exploitation et l'application de cette fiche portant sur le positionnement des émissions dans le temps. Cependant, pour le changement climatique, il existe l'outil Excel appelé « dynCO2 » (CIRAIG 2010), développé par le CIRAIG, qui permet de prendre en compte la distribution temporelle des émissions à l'aide d'un inventaire dynamique intégré. L'outil est totalement fonctionnel mais possède une certaine marge de progression.

3.1.2 Fiche n°2 – Réfléchir à un horizon temporel commun pour la comparaison de systèmes

Fiche n°2 – Considérer un horizon temporel commun pour la comparaison de systèmes						Flux agrégés (FA)			Facteurs de caractérisation
		Données d'activité	Procédés unitaires	Flux élémentaires primaires					
<p>Description de l'approche</p> <p>Envisager une unité fonctionnelle commune qui tienne compte de la durée de vie de chacun des systèmes étudiés</p>		<p>Quel enjeu ?</p> <p>Prendre en compte la temporalité de tous les systèmes étudiés</p>				<p>Niveau de développement</p> <p>faible ●●●●● élevé</p>			
<p>Exemple</p> <p>La comparaison entre 1 fenêtre de 50 ans et 2 fenêtres de 25 ans doit prendre en compte le fait que la deuxième fenêtre émet à partir de dans 25 ans (cf. section 2.3.1).</p>		<p>Action pour le praticien ?</p> <ol style="list-style-type: none"> Définir chaque système sur toute la durée de son cycle de vie Rapporter les impacts à une durée commune d'évaluation dans l'unité fonctionnelle 				<p>Acceptabilité scientifique</p> <p>faible ●●●●● élevé</p>			
<p>Autres fiches techniques liées</p> <ul style="list-style-type: none"> Fiche n°3 – Définir des scénarios prospectifs Fiche n°7 – Considérer des horizons temporels adaptés 		<p>Quelle collecte de données nécessaire ?</p> <ul style="list-style-type: none"> Données temporelles de chaque système étudié Données opérationnelles sur l'UF (quoi, quelle durée, combien, comment, où, pour qui, quand) 				<p>Opérationnalisation</p> <p>faible ●●●●● élevé</p>			
		<p>Pertinence dans quel cas ?</p> <ul style="list-style-type: none"> Forte différence entre les durées de vie des systèmes étudiés Différences de certaines étapes récurrentes (ex: réemploi, réparation...) 			<p>Catégories d'impact</p> <p>Toutes</p>				
<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> Eviter les erreurs d'interprétation dans le cas d'une comparaison (risque de non-conformité ISO) 		<p>Limites</p> <ul style="list-style-type: none"> Les durées de vies utilisées en ACV sont généralement théoriques, ce qui peut influencer les résultats (dynamiques ou non) 			<p>Besoins complémentaires</p> <ul style="list-style-type: none"> Appliquer les fiches techniques 3 et 7 Réaliser une analyse de sensibilité sur les variations potentielles des durées de vie 				

Figure 14 - Fiche n°2 – Réfléchir à un horizon temporel commun pour la comparaison de systèmes

Note complémentaire à la Fiche n°2 – Réfléchir à un horizon temporel commun pour la comparaison de systèmes

- Exemple

L'exemple des fenêtres est issu du chapitre 2.3.1.

- Catégories d'impact

Cette approche devrait s'appliquer à toutes les catégories d'impact et, en particulier, à celles qui sont évaluées en fonction d'un horizon temporel comme le changement climatique.

- Opérationnalisation

L'évaluation de l'opérationnalisation de l'approche est décrite plus précisément dans le Tableau 6. Les notes sur 5 sont orientées « opérationnalisation ».

Tableau 6 – Description de l'opérationnalisation de la Fiche n°2 – Réfléchir à un horizon temporel commun pour la comparaison de systèmes

Temps de mise en œuvre	Niveau d'expertise nécessaire	Besoins en données supplémentaires compliquées d'accès	Opérationnalisation
Faible (5/5)	Faible (5/5)	Assez faible (4/5)	5/5

3.1.3 Fiche n°3 – Définir des scénarios prospectifs

Fiche n°3 – Définir des scénarios prospectifs							
<p>Description de l'approche</p> <p>Prise en compte de changements présumés dans un futur défini, au niveau du système étudié ou des indicateurs environnementaux évalués</p>	<p>Quel enjeu ?</p> <p>Anticiper différentes situations futures potentielles</p>		<p>Niveau de développement</p> <p>faible <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> élevé</p>				
	<p>Action pour le praticien ?</p> <ul style="list-style-type: none"> Définir les éléments de modélisation affectés (données d'activité, impacts des procédés d'inventaires...) Identifier l'amplitude de leur évolution 		<p>Acceptabilité scientifique</p> <p>faible <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> élevé</p>				
	<p>Exemple</p> <ul style="list-style-type: none"> Substitution dans 10 ans de l'acier utilisé pour la carrosserie d'une voiture par un polymère Passage de coke à de la biomasse pour la production de chaleur dans le cadre de la production de ciment 		<p>Quelle collecte de données nécessaire ?</p> <ul style="list-style-type: none"> En fonction du scénario, les éventuels changements de valeur pour les impacts des procédés unitaires, les données d'activité ou les flux élémentaires primaires 		<p>Opérationnalisation</p> <p>faible <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/> élevé</p>		
<p>Autres fiches techniques liées</p> <ul style="list-style-type: none"> Fiche n°4 – Faire varier les données d'activité Fiche n°5 – Faire varier les flux élémentaires primaires 		<p>Pertinence dans quel cas ?</p> <p>En cas d'évolutions potentielles importantes du système étudié (améliorations techniques, évolutions voire ruptures technologiques...)</p>		<p>Catégories d'impact</p> <p>Toutes</p>			
<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> Permet d'anticiper et de comparer des situations futures par rapport à un scénario statique ou « business as usual » Application en pratique relativement simple pour le praticien au niveau du système étudié 		<p>Limites</p> <ul style="list-style-type: none"> Vision statique, exclusivement dans un futur défini, sans prise en compte des évolutions ni des comportements intrinsèques des systèmes → Risque de mauvaises prises de décisions Difficulté de modéliser l'avenir et incertitudes associées 		<p>Besoins complémentaires</p> <ul style="list-style-type: none"> Intégration des évolutions au cours du temps et des comportements temporels du système dans l'analyse prospective Facteurs de caractérisation prospectifs pour les indicateurs environnementaux Analyses de sensibilité 			

Figure 15 - Fiche n°3 – Définir des scénarios prospectifs

Note complémentaire à la Fiche n°3 – Définir des scénarios prospectifs

Comme évoqué en chapitre 2.3.2, l'ACV prospective est une sous-catégorie de l'ACV dynamique se focalisant exclusivement sur ce qui se passe à un moment instantané dans un futur défini.

- Exemples
 - Substitution dans 10 ans de l'acier utilisé pour la carrosserie d'une voiture par un polymère

Il est important de prendre en compte les évolutions de la production d'acier et du polymère dans 10 ans. La définition des scénarios prospectifs nécessite donc d'imaginer comment certains éléments du cycle de vie évolueront d'ici-là, en considérant l'incertitude qui en découle. Par exemple, il est recommandé de considérer les éléments suivants :

- La décarbonation des procédés et du mix électrique pour la production du matériau
- Les réductions de consommation d'énergie dues à l'optimisation des procédés
- L'utilisation de davantage de matière recyclée dans les prochaines années à venir.

Pour cet exemple, le praticien de l'ACV devrait donc collecter des données quant aux consommations d'énergie associées à la production d'acier, à la composition du mix électrique et à la teneur en recyclé de l'acier. Une fois collectées, le praticien de l'ACV est invité à discuter avec les professionnels du secteur pour déterminer une plage de valeurs à horizon 2030 et évaluer les résultats selon cette plage de valeur. Un exemple illustratif est représenté dans le Tableau 7.

Note : Ces valeurs peuvent selon les cas nécessiter plusieurs experts afin d'établir une moyenne, ou être fournies « à dire d'expert ». Enfin, les pouvoirs publics pourraient jouer un rôle à terme, dans la fourniture de données pertinentes sur certains scénarios prospectifs (exemple : le futur mix énergétique du pays)

Tableau 7 - Exemple d'établissement de scénario prospectif pour la substitution dans 10 ans de l'acier par un polymère pour la carrosserie d'une voiture.

Etablissement du scénario prospectif		Etat actuel	Prospectif à 30 ans
Mix électrique pour la production du matériau	Charbon	60%	50-40%
	Hydroélectrique	20%	20-25%
	Renouvelable	20%	30-50%
Consommations d'énergie	Electricité (kWh/kg)	0.63	0.55-0.48
Taux de recyclé		93%	94-98%

- Pertinence dans quel cas

La fiche n°3 mentionne qu'il faut engager une approche dynamique en particulier en cas **d'évolutions potentielles importantes du système étudié** (améliorations techniques, évolutions voire ruptures technologiques...).

Toutefois, il est également important d'intégrer des scénarios **statu quo ou qui empirent la situation**, afin d'avoir un panel de comparaison plus grand et plus pertinent. Autrement, en ne gardant qu'une perspective de réduction des impacts, le risque de surestimations de ces réductions est réel et omet la potentialité que les perspectives de réduction ne se mettent pas en place aussi rapidement que souhaité.

- Opérationnalisation

L'évaluation de l'opérationnalisation de l'approche est décrite plus précisément dans le Tableau 8. Les notes sur 5 sont orientées « opérationnalisation ».

Tableau 8 – Description de l'opérationnalisation de la Fiche n°3 – Définir des scénarios prospectifs

Temps de mise en œuvre	Niveau d'expertise nécessaire	Besoins en données supplémentaires compliquées d'accès	Opérationnalisation
Moyen (3/5)	Moyen (3/5)	Moyen (3/5)	3/5

3.2 Lors de la collecte des données

3.2.1 Fiche n°4 – Faire varier les données d'activité

Fiche n°4 – Faire varier les données d'activité								
<p>Description de l'approche</p> <p>Dynamisation temporelle des données collectées ou mesurées pour décrire le système étudié</p>		<p>Quel enjeu ?</p> <p>Représenter une activité plus proche de sa réalité temporelle</p>			<p>Niveau de développement</p> <p>faible ● ● ● ● ● élevé</p>			
<p>Exemple</p> <ul style="list-style-type: none"> Augmentation sur 10 ans du rendement de production d'un composé chimique de 80 à 82.5% Allègement sur 15 ans de 10 à 5 kg de métal pour une pièce de carrosserie automobile Réduction de la consommation énergétique d'un procédé d'extrusion sur 5 ans de 10 à 3kWh 		<p>Action pour le praticien ?</p> <p>Collecte de données et calcul des impacts à différents pas de temps en fonction de la période étudiée (par an, par mois...)</p>			<p>Acceptabilité scientifique</p> <p>faible ● ● ● ● ● élevé</p>			
<p>Autres fiches techniques liées</p> <ul style="list-style-type: none"> Fiche n°3 – Définir des scénarios prospectifs Fiche n°5 – Faire varier les flux élémentaires primaires Fiche n°6 – Faire varier les procédés d'arrière-plan Fiche n°7 – Considérer des horizons temporels adaptés Fiche n°8 – Utiliser des facteurs de caractérisation dynamiques 		<p>Quelle collecte de données nécessaire ?</p> <p>Changements de valeur des données en fonction du temps (éventuels changements technologiques...)</p>			<p>Opérationnalisation</p> <p>faible ● ● ● ● ● élevé</p>			
<p>Pertinence dans quel cas ?</p> <p>Forte variation de données sur la période étudiée (jour/nuit, par mois, par an...)</p>		<p>Catégories d'impact</p> <p>Toutes</p>						
<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> Bien que généralement déjà réalisé dans les analyses de sensibilité des ACV statiques, le complément ajouté est le positionnement dans le temps de ces évaluations 		<p>Limites</p> <ul style="list-style-type: none"> Disponibilité des données au fil du temps peut être difficile Approche inutile si des FC dynamiques ne sont pas associés (ex. par une simple analyse de sensibilité) 			<p>Besoins complémentaires</p> <ul style="list-style-type: none"> Nécessite une dynamisation respective de la caractérisation Fiches 7 et 8 			

Figure 16 - Fiche n°4 – Faire varier les données d'activité

Note complémentaire à la Fiche n°4 – Faire varier les données d’activité

- Exemple

Pour les trois exemples mentionnés dans la fiche n°4, il y a certes en enjeu de connaître les valeurs initiales et finales de variables (rendement, masse, consommation...) étudiées, mais également de savoir **comment cette variable évolue dans le temps**.

Par exemple, pour le rendement de production d’un composé chimique, il est crucial de savoir que celui-ci évolue de 80 à 82.5% en 10 ans, mais il faut également étudier la nature de l’évolution de cette variable sur 10 ans. **Cette évolution n’est pas nécessairement linéaire**, ce qui peut également influencer les résultats de manière plus ou moins significative, comme évoqué en chapitre 2.5.6 abordant le risque d’accumulation d’émissions liée à une prise de décision tardive.

- Quelle collecte de données nécessaire ?

En termes de collecte de données dans le cas d’ACV d’usines ou de procédés de fabrication à la chaîne, plutôt que d’aller chercher la donnée sur le terrain, le praticien de l’ACV peut utiliser l’outil [ECOFACT](#), développé par le bureau d’étude Pré Sustainability, qui permet d’obtenir des données de production et de consommations énergétiques en temps réel selon différents pas de temps (par heure, par jour...). (Pallas 2022)

- Pertinence

Il est recommandé de **faire varier les données d’activité en cas de forte variation sur la période étudiée**. L’étude de l’évolution de la donnée en question, évoquée ci-dessus, peut aider à déterminer **le pas de temps pertinent à étudier (par jour, par mois, par an...)**.

En effet, pour l’exemple du rendement de production, si le passage de 80 à 82.5% se fait en 2 mois, il ne vaut pas la peine d’utiliser un pas de temps par jour ni par an étant donné que l’évolution se fait de manière rapide.

- Opérationnalisation

L’évaluation de l’opérationnalisation de l’approche est décrite plus précisément dans le Tableau 9. Les notes sur 5 sont orientées « opérationnalisation ».

Tableau 9 – Description de l’opérationnalisation de la Fiche n°4 – Faire varier les données d’activité

Temps de mise en œuvre	Niveau d’expertise nécessaire	Besoins en données supplémentaires compliquées d’accès	Opérationnalisation
Faible (5/5)	Faible (5/5)	Assez faible (4/5)	5/5

3.2.2 Fiche n°5 – Faire varier les flux élémentaires primaires

Fiche n°5 – Faire varier les flux élémentaires primaires					Flux agrégés (FA) Données d'activité Procédés unitaires Flux élémentaires primaires Facteurs de caractérisation	
Description de l'approche Dynamisation temporelle des matières/énergies entrantes/sortantes d'un procédé d'inventaire		Quel enjeu ? Représenter un procédé d'inventaire plus proche de sa réalité temporelle		Niveau de développement <i>faible</i> ●●●●● <i>élevé</i>		
Exemple <ul style="list-style-type: none"> Réduction progressive des émissions de particules fines d'une voiture au diesel de 50% sur 10 ans Réduction de 20% en 5 ans de présence de micropolluants dans l'eau grâce au développement d'une nouvelle technique de filtration en station d'épuration 		Action pour le praticien ? Collecte de données et calcul des impacts à différents pas de temps en fonction de la période étudiée (par an, par mois...)		Acceptabilité scientifique <i>faible</i> ●●●●● <i>élevé</i>		
		Quelle collecte de données nécessaire ? Changements de valeur des données en fonction du temps (<i>éventuels changements technologiques...</i>)		Opérationnalisation <i>faible</i> ●●●●● <i>élevé</i>		
Autres fiches techniques liées <ul style="list-style-type: none"> Fiche n°3 – Définir des scénarios prospectifs Fiche n°4 – Faire varier les données d'activité Fiche n°6 – Faire varier les procédés d'arrière-plan Fiche n°8 – Utiliser des facteurs de caractérisation dynamiques 		Pertinence dans quel cas ? Forte variation de données sur la période étudiée (<i>jour/nuit, par mois, par an...</i>)		Catégories d'impact Toutes		
Avantages <ul style="list-style-type: none"> Permet d'apporter plus de nuances dans l'évaluation de certains flux qui peuvent varier fortement en fonction de la temporalité 		Limites <ul style="list-style-type: none"> Disponibilité des flux élémentaires primaires peut être difficile (ex. inventaires agrégés) Approche inutile si des FC dynamiques ne sont pas associés (ex. par une simple analyse de sensibilité) 		Besoins complémentaires <ul style="list-style-type: none"> Nécessité d'une plus grande décomposition des flux élémentaires d'inventaire entre ceux issus des procédés d'arrière-plan et les émissions directes Nécessite une dynamisation respective de la caractérisation 		

Figure 17 - Fiche n°5 – Faire varier les flux élémentaires primaires

Note complémentaire à la Fiche n°5 – Faire varier les flux élémentaires primaires

- Opérationnalisation

L'évaluation de l'opérationnalisation de l'approche est décrite plus précisément dans le Tableau 10. Les notes sur 5 sont orientées « opérationnalisation ».

Tableau 10 – Description de l'opérationnalisation de la Fiche n°1 - Positionner les émissions dans le temps

Temps de mise en œuvre	Niveau d'expertise nécessaire	Besoins en données supplémentaires compliquées d'accès	Opérationnalisation
Faible (5/5)	Assez faible (4/5)	Assez faible (3/5)	4/5

3.3 Lors de la construction des inventaires

3.3.1 Fiche n°6 – Faire varier les procédés d'arrière-plan

Fiche n°6 – Faire varier les procédés d'arrière-plan					Flux agrégés (FA)		Facteurs de caractérisation	
		Données d'activité	Procédés unitaires	Flux élémentaires primaires				
<p>Description de l'approche</p> <p>Dynamisation temporelle au sein d'un procédé d'inventaire, à travers une modification des flux élémentaires des procédés d'arrière-plan</p>		<p>Quel enjeu ?</p> <p>Adapter un procédé d'inventaire à sa réalité temporelle</p>			<p>Niveau de développement</p> <p>faible ●●●●● élevé</p>			
<p>Exemple</p> <ul style="list-style-type: none"> Evolution du mix électrique français avec une plus grande part d'énergies renouvelables Evolution des émissions du transport particulier (1 pers.km) en conséquence de l'électrification du parc automobile 		<p>Action pour le praticien ?</p> <p>Utilisation d'outils offrant des inventaires de cycle de vie dynamiques (DyPLCA, Temporalis)</p>			<p>Acceptabilité scientifique</p> <p>faible ●●●●● élevé</p>			
		<p>Quelle collecte de données nécessaire ?</p> <p>Pas de collecte de données sinon les données temporelles des inventaires dynamiques</p>			<p>Opérationnalisation</p> <p>faible ●●●●● élevé</p>			
<p>Autres fiches techniques liées</p> <ul style="list-style-type: none"> Fiche n°4 – Faire varier les données d'activité Fiche n°5 – Faire varier les flux élémentaires primaires 		<p>Pertinence dans quel cas ?</p> <p>Données variables sur des longues durées (> 5ans)</p>			<p>Catégories d'impact</p> <p>Toutes</p>			
<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> Permet d'apporter plus de nuances dans la modélisation de certains procédés d'inventaires qui peuvent varier fortement en fonction de la temporalité 		<p>Limites</p> <ul style="list-style-type: none"> Les bases de données traditionnelles n'offrent pas d'ICV dynamiques Outils existants difficilement utilisables pour le praticien de l'ACV (besoin d'une formation pour prise en main) 			<p>Besoins complémentaires</p> <ul style="list-style-type: none"> Dynamisation des bases de données traditionnelles Développement et facilitation de l'utilisation des outils existants 			

Figure 18 - Fiche n°6 – Faire varier les procédés d'arrière-plan

Note complémentaire à la Fiche n°6 – Faire varier les procédés d’arrière-plan

Dans le cadre de cette étude et, plus particulièrement, dans le cadre de cette fiche n°6, on distingue les données de premier-plan incarnant techniquement le système à modéliser des données d’arrière-plan qui décrivent le système de manière plus générale et qui peuvent être obtenues à partir des bases de données. (DEISO 2024) En d’autres termes, sont comprises dans les données d’arrière-plan les mix électriques, les transports, ou les matériaux font appel eux-mêmes à des mix électriques ou des transports, etc.

- Action pour le praticien

Les bases de données dynamiques constituent un élément décisif réaliser une ACV dynamique rigoureuse, notamment pour les données d’arrière-plan. En effet, alors que les données de premier plan peuvent être dynamisées par le praticien de l’ACV de manière relativement aisée, ce dernier a très peu de marge de manœuvre pour dynamiser les données d’arrière-plan, généralement dans les mains des développeurs des bases de données.

C’est pourquoi, des outils sont en cours de développement afin de rendre la dynamisation des données d’inventaire possible. En particulier, deux bases de données temporalisées gagnent en considération dans la communauté scientifique, à savoir :

- **DyPLCA** est un outil permettant de développer un outil d’inventaire dynamique, dans lequel les données d’arrière-plan sont rendues dynamiques. La caractéristique de l’outil est qu’il est calé sur la structure de la base de données ecoinvent. Il s’agit d’un outil complexe à utiliser. Il peut nécessiter une formation initiale de plus ou moins 2 jours. Il s’agit d’étapes et règles à respecter, mais pas de programmation à effectuer. Cependant, les temps de calcul sont assez longs, ce qui peut freiner l’application à toutes les praticiennes et tous les praticiens. (Recherche) 2013)
- **Temporalis** est une méthodologie « open-source » qui n’utilise pas les données d’arrière-plan et utilise une autre méthode pour placer l’inventaire et les émissions dans le temps. Il faut tout programmer car l’outil est lié au software Brightway, qui se base sur de la programmation. La méthode est différente de DyPLCA, mais il n’existe pas de publication qui les compare. (Cardellini 2018)

Notons que les bases de données plus traditionnelles (Ecoinvent, Agribalyse...) n’offrent pas de données avec ce niveau de détails.

- Opérationnalisation

L’évaluation de l’opérationnalisation de l’approche est décrite plus précisément dans le Tableau 11. Les notes sur 5 sont orientées « opérationnalisation ».

Tableau 11 – Description de l’opérationnalisation de la Fiche n°1 - Positionner les émissions dans le temps

Temps de mise en œuvre	Niveau d’expertise nécessaire	Besoins en données supplémentaires compliquées d’accès	Opérationnalisation
Elevé (1/5)	Assez élevé (2/5)	Elevé (1/5)	1/5

3.4 Lors de la caractérisation des impacts

3.4.1 Fiche n°7 – Considérer des horizons temporels adaptés

Fiche n°7 – Considérer des horizons temporels adaptés					Flux agrégés (FA) Données d'activité Procédés unitaires Flux élémentaires primaires			Facteurs de caractérisation
<p>Description de l'approche</p> <p>Choix d'un horizon temporel (HT) adapté non seulement à l'indicateur d'impact étudié mais surtout au cas d'étude, en fonction des flux élémentaires clés</p>		<p>Quel enjeu ?</p> <ul style="list-style-type: none"> Apporter de la nuance et réduire l'incertitude dans l'interprétation des résultats pour un indicateur donné 			<p>Niveau de développement</p> <p>faible élevé</p>			
<p>Exemple</p> <ul style="list-style-type: none"> Pour le changement climatique, choix d'un horizon temporel à 20 et 100 ans pour la comparaison de deux procédés agricoles (avec émissions significatives de CH₄) Analyse et comparaison de la toxicité de la fabrication d'un pneu de camion à partir de différents matériaux sur 20, 100 et 1000 ans 		<p>Action pour le praticien ?</p> <ol style="list-style-type: none"> Analyser les méthodes de caractérisation disponibles pour différents HT Vérifier que les méthodes utilisées permettent d'identifier les flux significatifs : <ul style="list-style-type: none"> Si oui : identifier les flux significatifs et leurs différences d'impact selon les HT Si non : rechercher des informations sur les flux significatifs à considérer (à dire d'expert) 			<p>Acceptabilité scientifique</p> <p>faible élevé</p>			
<p>Autres fiches techniques liées</p> <ul style="list-style-type: none"> Fiche n°2 – Réfléchir à un horizon temporel commun pour la comparaison de systèmes Fiche n°8 – Utiliser des facteurs de caractérisation dynamiques 		<p>Quelle collecte de données nécessaire ?</p> <ul style="list-style-type: none"> Confirmation de l'identification des flux significatifs à dire d'experts pour les catégories d'impact évaluées 			<p>Opérationnalisation</p> <p>faible élevé</p>			
		<p>Pertinence dans quel cas ?</p> <ul style="list-style-type: none"> En fonction des flux significatifs identifiés et de la robustesse de la méthode d'identification En fonction de l'éventuelle évolution de l'impact d'un flux selon l'horizon temporel choisi (ex. CH₄). 		<p>Catégories d'impact</p> <p>Toutes</p>				
<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> Permet une évaluation plus juste des impacts Permet de mettre en valeur certains impacts « cachés » par les méthodes conventionnelles (ex. toxicité à court terme) 		<p>Limites</p> <ul style="list-style-type: none"> Les méthodes ne proposent pas toujours plusieurs HT pour les indicateurs (ReCiPe en propose) Les méthodes actuelles pourraient omettre des flux significatifs Risque de confusion entre HT de l'évaluation de l'impact et HT du système étudié 			<p>Besoins complémentaires</p> <ul style="list-style-type: none"> Outil ACV/ Base de données permettant le choix de différents horizons temporels Etablissement de FC dynamiques à plusieurs HT (20, 50, 100, 500, 1000 ans, voire selon le choix du praticien) 			

Figure 19 - Fiche n°7 – Considérer des horizons temporels adaptés

Note complémentaire à la Fiche n°7 – Considérer des horizons temporels adaptés

- Exemples

Les deux exemples présentés dans la fiche n°7 sont particulièrement concernés par la présente approche.

- D'une part, comme évoqué au chapitre 2.3.1, la contribution du méthane à l'effet de serre varie fortement au cours des premières décennies après émission.²¹ Considérer un HT (horizon temporel) à 100 ans ne permet pas de refléter la réelle contribution du méthane à l'effet de serre à court-terme.

Ainsi, en cas d'émissions significatives de méthane (>20%), il est recommandé au praticien de choisir des HT de 20 et 100 ans. Pour le CO₂, les HT les plus pertinents sont plutôt 100 et 500 ans.

- D'autre part, pour la toxicité, comme évoqué en chapitre 2.3.1, **il vaut mieux considérer des HT courts (20 ans) et longs (500-1000 ans)** pour caractériser aussi bien les molécules très toxiques à court-terme (ex. composés organiques toxiques comme la dioxine) et les molécules métalliques qui prennent plus de temps à se stabiliser (ex. plomb).

- Quel enjeu ?

Outre l'enjeu d'apporter de la nuance dans l'interprétation des résultats, considérer des horizons temporels adaptés permet également de **réduire l'incertitude dans l'analyse des résultats**. En effet, le choix de l'horizon temporel est tout aussi impactant en termes d'incertitudes que la somme des incertitudes liés au choix des procédés. En suivant cette approche, cette incertitude peut être levée en partie.

- Action pour le praticien ?

Il est recommandé aux praticiens qui maîtrisent les enjeux et les risques de biais de l'horizon temporel de :

1. Analyser les méthodes de caractérisation disponibles pour différents HT (minimum 2 pour représenter les effets court/long terme)
2. Vérifier que les méthodes utilisées permettent d'identifier les flux significatifs :
 - Si oui : identifier les flux significatifs et leurs différences d'impact selon les HT
 - Si non : rechercher des informations sur les flux significatifs à considérer (à dire d'expert)

Parmi plusieurs méthodes de caractérisation existantes, la méthode ReCiPe2016, développée par (Huijbregts, et al. 2017) permet au praticien de choisir parmi 3 horizons temporels différents pour chaque catégorie d'impact. Par exemple, pour le changement climatique, la perspective « hiérarchisée » considère un horizon temporel de 100 ans pour le PRG, alors que les perspectives « individualistes » et « égalitaires » considèrent des horizons temporels de 20 et 1000 ans, respectivement.

Le choix est donc laissé au praticien de sélectionner l'horizon temporel adapté à son cas d'étude, ou de discuter les résultats en fonction de différents horizons temporels, en pratiquant des analyses de sensibilité. Par exemple, on choisira un horizon temporel de 20 ans si le méthane est le GES principal, ou 100 ou 500 ans pour si c'est le CO₂ ou pour intégrer la notion de générations futures.

- Opérationnalisation

L'évaluation de l'opérationnalisation de l'approche est décrite plus précisément dans le Tableau 12. Les notes sur 5 sont orientées « opérationnalisation ».

²¹ Pour rappel, la molécule de méthane a un forçage radiatif résiduel plus élevé que le CO₂ sur les 50 premières années après émission.

Tableau 12 – Description de l’opérationnalisation de la Fiche n°1 - Positionner les émissions dans le temps

Temps de mise en œuvre	Niveau d’expertise nécessaire	Besoins en données supplémentaires compliquées d’accès	Opérationnalisation
Assez faible (4/5)	Assez élevé (2/5)	Moyen (3/5)	3/5

3.4.2 Fiche n°8 – Utiliser des facteurs de caractérisation dynamiques

Fiche n°8 – Utiliser des facteurs de caractérisation dynamiques							
<p>Description de l'approche</p> <p>Evaluation d'un indicateur environnemental à travers des facteurs adaptés à une période choisie par le praticien de l'ACV.</p>		<p>Quel enjeu ?</p> <p>Permettre l'évaluation d'un indicateur environnemental en fonction du temps</p>			<p>Niveau de développement</p> <p>faible élevé</p>		
<p>Exemple</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prise en compte de la saisonnalité dans l'utilisation de l'eau (hiver vs. été) • Prise en compte de l'alternance jour/nuit de l'émission de particules photochimiques (ex. NO_x) par une voiture thermique 		<p>Action pour le praticien ?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identification des variations potentielles des impacts selon la période d'évaluation retenue • Association des flux agrégés aux FC dynamiques correspondants collectés dans la littérature 			<p>Acceptabilité scientifique</p> <p>faible élevé</p>		
		<p>Quelle collecte de données nécessaire ?</p> <ul style="list-style-type: none"> • FC dynamiques publiés dans la littérature 			<p>Opérationnalisation</p> <p>faible élevé</p>		
<p>Autres fiches techniques liées</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fiche n°5 – Faire varier les flux élémentaires primaires • Fiche n°7 – Considérer des horizons temporels adaptés 		<p>Pertinence dans quel cas ?</p> <p>Forte variation de données sur la période étudiée (<i>jour/nuit, par mois, par an...</i>)</p>		<p>Catégories d'impact</p> <p>Toutes</p>			
<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> • Permet coupler dynamisation des enjeux environnementaux avec dynamisation des flux agrégés • Simple d'utilisation s'il existe des FC dynamiques dans la littérature (cas de CC et Tox) 		<p>Limites</p> <ul style="list-style-type: none"> • FC dynamiques difficiles à établir par le praticien de l'ACV, besoin de tables de valeurs publiées dans la littérature • FC dynamiques existants seulement pour 2 indicateurs (CC et Tox) dans la littérature 		<p>Besoins complémentaires</p> <ul style="list-style-type: none"> • FC dynamiques pour les autres indicateurs (en particulier les ressources) • Implémentation dans les outils ACV • Dynamisation des autres données associées (données d'activité, flux élémentaires primaires...) 			

Figure 20 – Fiche n°8 - Utiliser des facteurs de caractérisation dynamiques

Note complémentaire à la Fiche n°8 - Utiliser des facteurs de caractérisation dynamiques

- Opérationnalisation

L'évaluation de l'opérationnalisation de l'approche est décrite plus précisément dans le Tableau 13. Les notes sur 5 sont orientées « opérationnalisation ».

Tableau 13 – Description de l'opérationnalisation de la Fiche n°1 - Positionner les émissions dans le temps

Temps de mise en œuvre	Niveau d'expertise nécessaire	Besoins en données supplémentaires compliquées d'accès	Opérationnalisation
Moyen (3/5)	Élevé (1/5)	Elevé (1/5)	2/5

- Besoins complémentaires

L'ACV Dynamique permet d'analyser les évolutions temporelles dans le temps, là où l'ACV conventionnelle a tendance à tout ramener au temps t_0 après la première émission. Or, étant donné que tout n'a pas lieu au même moment dans le cycle de vie, comme pour la dynamisation des flux agrégés, il faut également une dynamisation des facteurs de caractérisation (FC) pour mieux représenter les effets dynamiques des différents indicateurs ACV.

Par exemple, pour le changement climatique, **les méthodes de caractérisation conventionnelles considèrent un FC identique sur 100 ans puis égal à 0 après**. Cette modélisation est une approximation car le pouvoir de réchauffement global (PRG) d'un gaz à effet de serre ne s'arrête pas après 100, et le PRG d'un gaz n'est par ailleurs pas stable non plus.

Ainsi, afin de représenter ces effets de manière dynamique, l'on pourrait imaginer coupler des FC qui varient d'année en année selon le PRG effectif du gaz avec un taux d'actualisation qui attribuerait plus de poids à une émission émise à un moment plutôt qu'un autre.

En ce qui concerne le praticien de l'ACV, il ne lui est pas demandé de générer ces FC dynamiques, mais plutôt **d'utiliser à bon escient ceux qui existent**. Il est donc de la responsabilité de la communauté scientifique de développer des FC dynamiques opérationnels pour les praticiens de l'ACV.

3.5 Lors de l'interprétation des résultats

3.5.1 Fiche n°9 – Présenter des résultats dynamiques

Fiche n°9 – Présenter des résultats dynamiques							Flux agrégés (FA)			Facteurs de caractérisation			
		Données d'activité	Procédés unitaires	Flux élémentaires primaires					Facteurs de caractérisation				
<p>Description de l'approche</p> <p>Représentation graphique des impacts environnementaux dans le temps</p>		<p>Quel enjeu ?</p> <p>Eviter de tirer des conclusions à partir de résultats statiques fortement influencés par la temporalité du système étudié</p>				<p>Niveau de développement</p> <p>faible ●●●●● élevé</p>							
<p>Exemple</p> <p>Représentation du forçage radiatif instantané dans le temps de l'ensemble du cycle de vie de deux types de murs (conventionnels et bio-sourcé), issu de Zieger et al. (2020)</p>						<p>Action pour le praticien ?</p> <p>Mise en forme des résultats dynamiques mesurés à partir d'approches dynamiques</p>				<p>Acceptabilité scientifique</p> <p>faible ●●●●● élevé</p>			
		<p>Quelle collecte de données nécessaire ?</p> <ul style="list-style-type: none"> Aucune 				<p>Opérationnalisation</p> <p>faible ●●●●● élevé</p>							
<p>Autres fiches techniques liées</p> <ul style="list-style-type: none"> Fiche n°1 – Positionner les émissions dans le temps Autres fiches de dynamisation (4 à 8) 		<p>Pertinence dans quel cas ?</p> <p>Lorsque des résultats dynamiques ont été mesurés</p>			<p>Catégories d'impact</p> <p>Toutes</p>								
<p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> Permet une interprétation plus nuancée des résultats en fonction du temps Réduction du risque de mauvaises prises de décision si tous les impacts sont ramenés au temps t_0 		<p>Limites</p> <ul style="list-style-type: none"> Nécessite un effort significatif de la part du praticien pour mettre en image les résultats dynamiques calculés Complexifie la prise de décision car pas de « résultat » final mais plutôt une courbe finale 			<p>Besoins complémentaires</p> <ul style="list-style-type: none"> Outil ACV permettant d'obtenir ce type de graphes facilement sur base des résultats dynamiques 								

Figure 21 - Fiche n°9 – Présenter des résultats dynamiques

Note complémentaire à la Fiche n°9 – Présenter des résultats dynamiques

- Exemple

L'exemple tiré de (Zieger, Lecompte and Hellouin de Menibus 2020) est présenté en Figure 22. Sans entrer dans le détail des résultats, le graphe représente l'évolution du forçage radiatif instantané (autrement dit de la contribution au changement climatique) dans le temps de l'ensemble du cycle de vie de 3 types de murs pour bâtiment :

- Un mur conventionnel (« conventional », en anglais) fait de béton avec isolation thermique
- Deux murs biosourcés (« biobased », en anglais) avec une différenciation au niveau du mode de traitement des pailles en fin de vie qui est soit compostée (« composted », en anglais), soit incinérée (« incinerated », en anglais).

Ce type de représentation dynamique des résultats permet d'enrichir la comparaison des résultats entre les 3 scénarios.

Le mur conventionnel a d'abord un impact négatif sur le changement climatique lors la production du béton, alors que les murs biosourcés contribuent positivement au changement climatique lors des 50 premières années pendant la croissance de la biomasse qui stocke du carbone. On peut également observer les impacts différentes étapes au cours de l'utilisation du bâtiment (application de peintures, d'enduits...).

Cette représentation permet donc de se rendre compte que les murs biosourcés ont un effet bénéfique sur le changement climatique pendant 50 ans, alors que le mur en béton contribue directement à cet effet. Ce genre d'observation ne peut être établi en ACV conventionnelle en ramenant tous les impacts au temps t_0 après première émission.

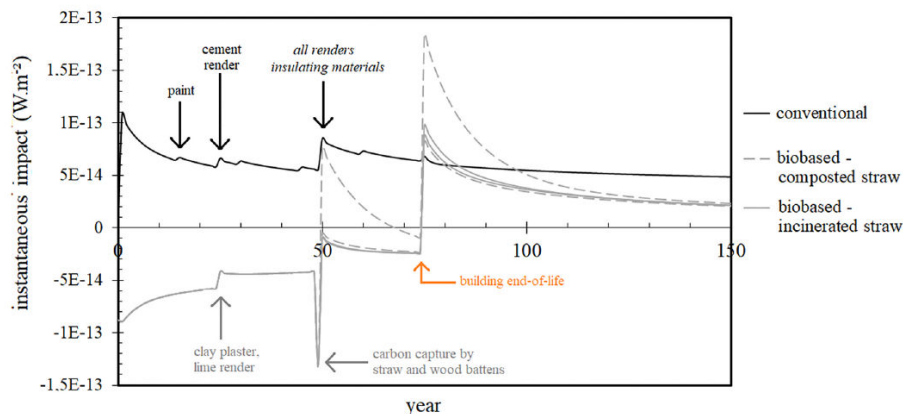


Figure 22 - Représentation du forçage radiatif instantané dans le temps sur l'ensemble du cycle de vie de trois types de murs (un conventionnel et deux biosourcés), issu de (Zieger, Lecompte and Hellouin de Menibus 2020).

- Opérationnalisation

L'évaluation de l'opérationnalisation de l'approche est décrite plus précisément dans le Tableau 14. Les notes sur 5 sont orientées « opérationnalisation ».

Tableau 14 – Description de l'opérationnalisation de la Fiche n°1 - Positionner les émissions dans le temps

Temps de mise en œuvre	Niveau d'expertise nécessaire	Besoins en données supplémentaires compliquées d'accès	Opérationnalisation
Elevé (1/5)	Moyen (3/5)	Moyen (3/5)	2/5

3.5.2 Fiche n°10 – Faire des analyses de sensibilité pour montrer l'importance à considérer le facteur temps

Fiche n°10 – Réaliser des analyses de sensibilité pour montrer l'importance à considérer le facteur temps					Flux agrégés (FA) Données d'activité Procédés unitaires Flux élémentaires primaires			Facteurs de caractérisation
Description de l'approche Proposer des analyses de sensibilité permettant de tenir compte des incertitudes associées aux approches dynamiques		Quel enjeu ? Présenter les incertitudes liées à la modélisation dynamique effectuée			Niveau de développement faible ●●●●● élevé			
Exemple <ul style="list-style-type: none"> Variation de la durée de vie théorique d'un bâtiment entre 20 et 100 ans selon l'incertitude associée Prise en compte de plusieurs scénarios prospectifs quant au mix énergétique utilisé pour modéliser la production de ciment dans 50 ans 		Action pour le praticien ? Proposer des plages de valeurs pour les données d'activités et/ou flux élémentaires et/ou facteurs de caractérisation permettant de faire varier les résultats en représentant le champ des possibles sur la période étudiée			Acceptabilité scientifique faible ●●●●● élevé			
Autres fiches techniques liées <ul style="list-style-type: none"> Fiche n°3 – Définir des scénarios prospectifs Fiche n°4 – Faire varier les données d'activité Fiche n°5 – Faire varier les flux élémentaires primaires Fiche n°6 – Faire varier les procédés d'arrière-plan Fiche n°7 – Considérer des horizons temporels adaptés 		Quelle collecte de données nécessaire ? <ul style="list-style-type: none"> Données d'activités, flux élémentaires ou facteurs de caractérisation associés à l'analyse de sensibilité en question 			Opérationnalisation faible ●●●●● élevé			
Avantages <ul style="list-style-type: none"> Mieux visualiser le champ des possibles quant aux valeurs d'impacts Apporter plus de nuances dans la prise de décision résultant de l'ACV dynamique 		Pertinence dans quel cas ? <ul style="list-style-type: none"> Pour toute donnée et/ou flux significatif d'une ACV dynamique Pour les FC dans des cas spécifiques (en fonction de l'appréciation de la méthode par le praticien) 			Catégories d'impact Toutes			
Limites <ul style="list-style-type: none"> Si l'analyse de sensibilité intègre plusieurs éléments, il peut être difficile de distinguer séparément leurs effets sur les résultats 		Besoins complémentaires <ul style="list-style-type: none"> Disposer d'outils ACV permettant des analyses de sensibilité multicritères Sélectionner les éléments les plus influents pour parvenir à des conclusions claires 						

Figure 23 - Fiche n°10 – Faire des analyses de sensibilité pour montrer l'importance à considérer le facteur temps

Note complémentaire à la Fiche n°10 – Faire des analyses de sensibilité pour montrer l'importance à considérer le facteur temps

- Opérationnalisation

L'évaluation de l'opérationnalisation de l'approche est décrite plus précisément dans le Tableau 15. Les notes sur 5 sont orientées « opérationnalisation ».

Tableau 15 – Description de l'opérationnalisation de la Fiche n°1 - Positionner les émissions dans le temps

Temps de mise en œuvre	Niveau d'expertise nécessaire	Besoins en données supplémentaires compliquées d'accès	Opérationnalisation
Assez faible (4/5)	Faible (5/5)	Dépendant du cas (-/5)	5/5

3.6 Aide à la sélection des fiches techniques pertinentes

Chacune des 10 fiches techniques présentées ci-dessus sont pertinentes à appliquer seulement dans certains cas de figure. Pour illustrer cela, une case « Pertinence dans quel cas ? » a été ajoutée à chaque fiche technique.

Afin d'aider le praticien de l'ACV dans la sélection des fiches techniques pertinentes à appliquer à son cas d'étude, les différents critères de pertinences ont été rassemblés sous forme de logigramme dans la Figure 24.

Le praticien est invité à parcourir les 7 bulles bleues et, si le contenu correspond à son cas d'étude, il est recommandé d'appliquer les fiches techniques associées en jaune.

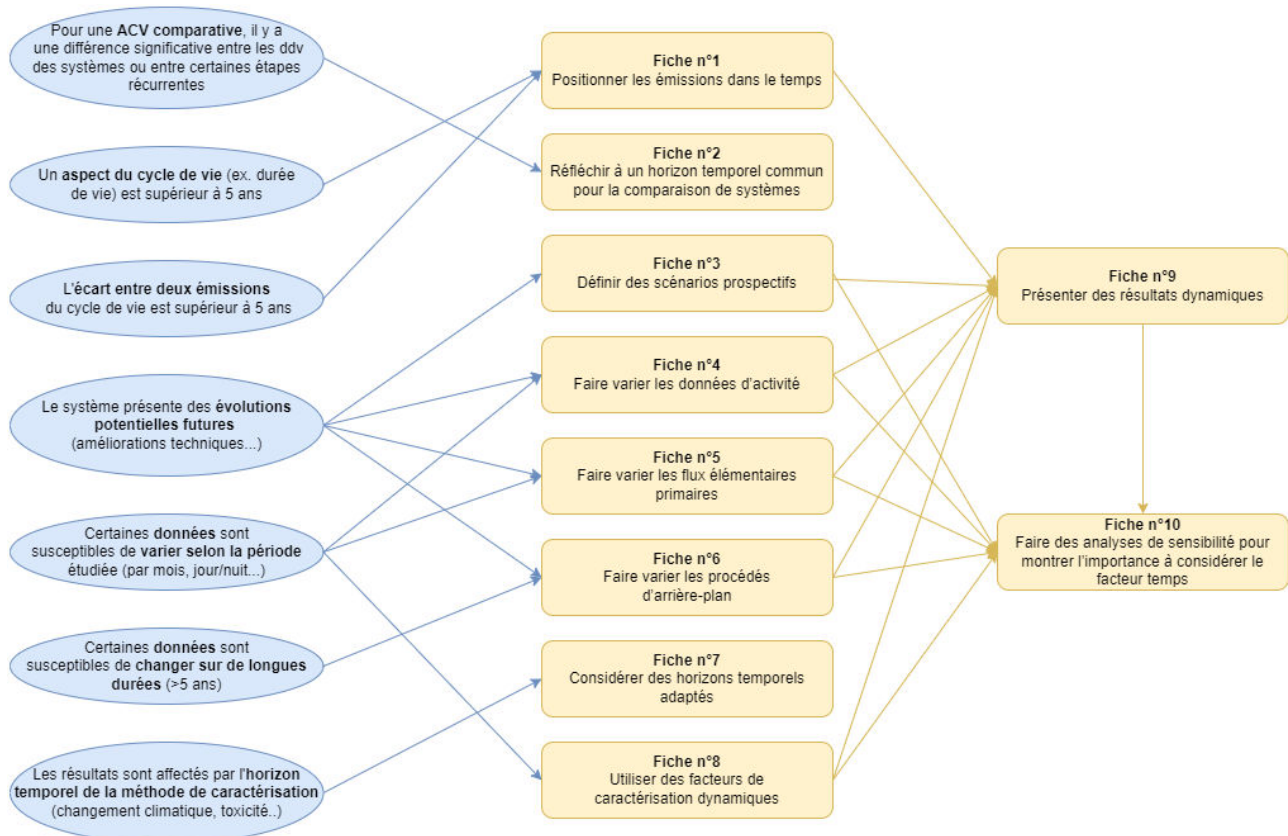


Figure 24 - Logigramme d'aide à la sélection des fiches techniques pertinentes lors d'une ACV dynamique.

3.7 Cas d'études

L'objectif de cette partie est de mettre en œuvre l'approche théorique de l'ACV dynamique présentée jusqu'à présent.

A travers deux cas d'études, les critères pour lancer une approche dynamique (chapitre 2.4.3 et, en particulier, le logigramme de la Figure 9) seront discutés et complétés par une application des fiches techniques jugées pertinentes.

Note : ces deux cas d'études ont pour objectif unique d'être pédagogiques et de présenter au praticien de l'ACV comment appliquer les différents critères et logigrammes élaborés dans cette étude, et les limites de l'ACV dynamique telle que développée à l'heure actuelle.

Les valeurs utilisées ne reflètent donc pas nécessairement la réalité et permettent néanmoins de mettre en évidence les enjeux du secteur.

3.7.1 Cas 1 : Stockage d'acier dans du béton pendant une longue durée

Le béton, en raison de ses propriétés mécaniques et de sa longévité, est largement utilisé dans les infrastructures modernes. Pour des raisons structurales, le béton est généralement coulé autour d'une armature en acier. Les infrastructures composées de béton ayant des durées de vie de plusieurs décennies, elles **immobilisent des ressources et du carbone** pendant toute cette durée d'utilisation. De plus, leur fin de vie engendre la problématique des **émissions décalées dans le temps** abordée au chapitre 2.3.1. Pour ces deux raisons, les choix de modélisation en ACV de ces deux éléments peuvent affecter les résultats finaux de manière significative.

1. Critères pour décider d'engager une approche dynamique ou non

Tout d'abord, le praticien doit évaluer la pertinence ou non d'engager une approche dynamique pour ce cas d'étude-ci selon le logigramme présenté en Figure 9. En l'occurrence, la réponse à la première question est positive étant donné que le recyclage du béton et de ses éléments structuraux aura lieu dans plusieurs années, avec des procédés de recyclage qui sont susceptibles de changer par rapport à aujourd'hui (évolution des techniques de recyclage, des mix énergétiques et électriques...). Le logigramme nous recommande donc d'engager une approche dynamique, comme le démontre la Figure 25.

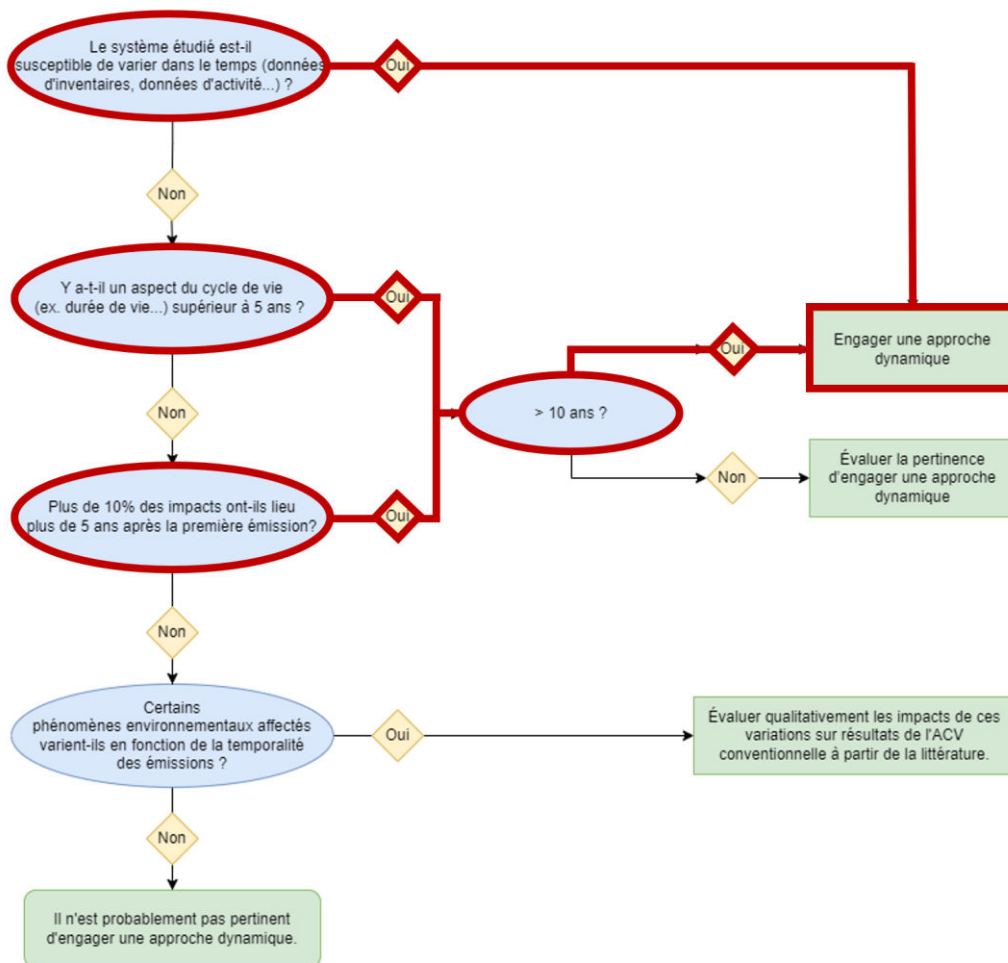


Figure 25 - Logigramme de prise de décision pour l'engagement ou non d'une approche dynamique en ACV appliqué au cas d'étude n°1 portant sur le stockage d'acier dans du béton pendant une longue durée.

Note : En cas de doute, il est recommandé au praticien d'évaluer les autres questions du logigramme. En l'occurrence, le cas d'étude répond positivement aux deux autres questions du logigramme, ce qui confirme qu'il est nécessaire d'engager une approche dynamique à ce cas-ci.

2. Identification des fiches techniques pertinentes

Ensuite, le praticien doit réfléchir aux éléments à intégrer dans son ACV dynamique. En effet, pour rappel, il n'en vaut pas toujours la peine de dynamiser tous les éléments de l'ACV. Pour ce faire, il est recommandé de suivre le logigramme d'aide à la sélection des fiches techniques représenté en Figure 24.

Pour ce cas d'étude, comme présenté en Figure 26, 3 critères sont remplis, à savoir :

1. Au moins un aspect du cycle de vie est supérieur à 5 ans : la durée de vie du béton est de plusieurs décennies.
2. L'écart entre au moins deux émissions du cycle de vie est supérieur à 5 ans : découle du point 1.
3. Le système présente des évolutions potentielles futures : les processus de recyclage de béton et métaux vont évoluer (techniques de recyclage, mix énergétiques et électriques...).

Ainsi, le logigramme de la Figure 26 nous recommande d'appliquer les fiches 1, 3, 4, 5, 6, 9 et 10.

Il est important de noter que la séparation des 10 fiches techniques relève d'un enjeu de pédagogie afin de présenter les actions de manières succinctes au praticien de l'ACV, mais que toute approche dynamique en ACV demande probablement l'application de plusieurs de ces fiches simultanément.

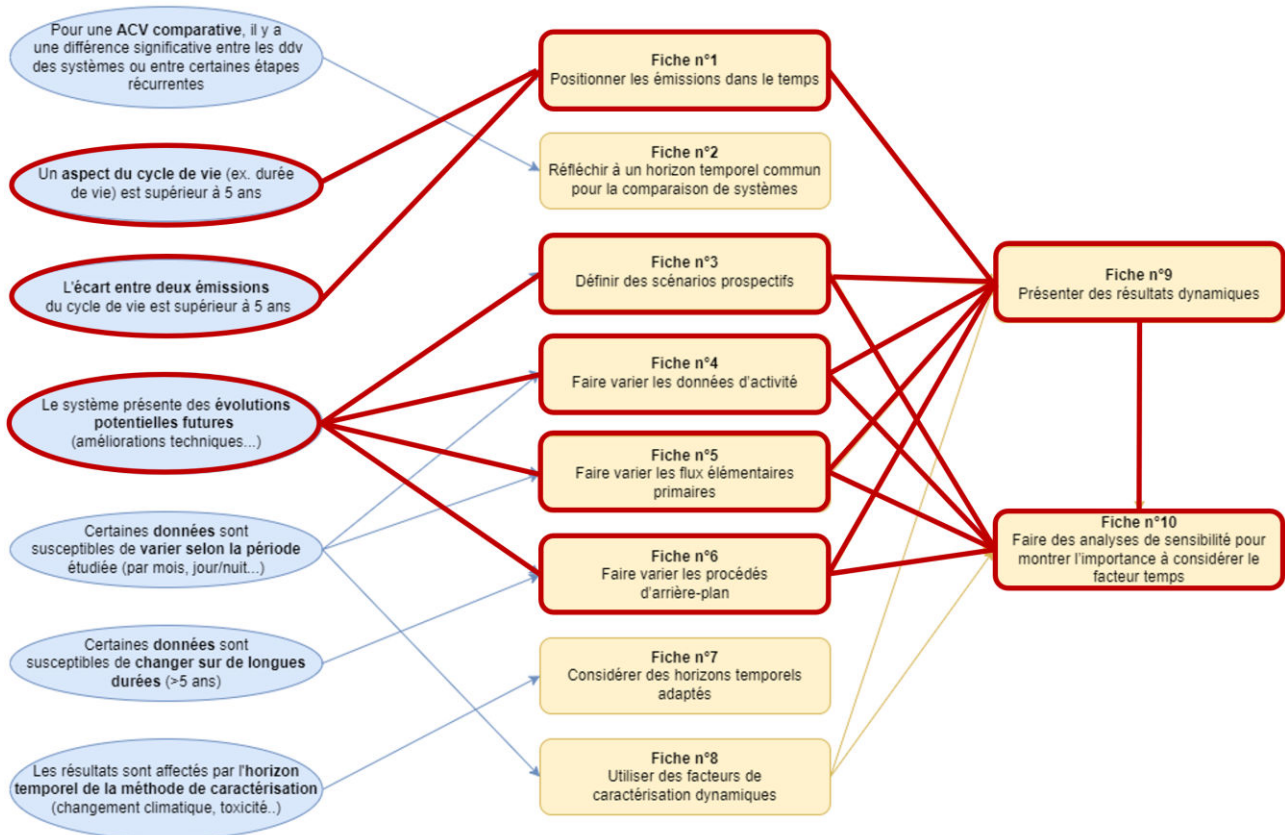


Figure 26 - Logigramme d'aide à la sélection des fiches techniques appliqué au cas d'étude n°1 portant sur le stockage d'acier dans du béton pendant une longue durée.

3. Positionnement des émissions dans le temps

Tout d'abord, afin de mieux percevoir les enjeux temporels du cas étudié, les émissions principales sont positionnées dans le temps comme le propose la fiche n°1. Le Tableau 16 montre que l'écart entre les émissions de production et de fin de vie est de plus de 10 ans (75 ans en l'occurrence), ce qui confirme que l'application de l'approche dynamique est bel et bien pertinente.

Tableau 16 – Application de la Fiche n°1 sur le positionnement des émissions dans le temps au cas d'étude portant sur le stockage d'acier dans du béton pendant une longue durée.

Instant t	Années après t ₀	Description
t ₀	0	Impacts de la production de l'armature en acier Gestion de certaines chutes de production
t ₁	1	Transport et application de l'armature au bâtiment avec le béton
t ₃	75	Séparation de l'acier du béton après démolition du bâtiment Recyclage de l'acier Evitement de la matière vierge associée

Dès lors, en observant les fiches techniques sélectionnées dans la Figure 26, la stratégie d'application de l'approche dynamique devient plus claire :

- D'une part, les fiches 3, 4, 5, 6 et 10 permettront d'étudier la question de l'évolution des techniques de recyclage en fin de vie en établissant des scénarios prospectifs sur base de différentes données d'activité
- D'autre part, les fiches 7, 9 et 10 permettront d'étudier l'enjeu des émissions décalées dans le temps ainsi que l'immobilisation des ressources et du carbone

4. Evolution des techniques de recyclage et de production évitée (fiches 3, 4, 5, 6 et 10)

La fiche n°3 recommande au praticien de définir les éléments de modélisation affectés par les scénarios prospectifs. Cela peut impliquer de faire varier certaines données d'activité (fiche n°4), des flux élémentaires primaires (fiche n°5) ou des procédés d'arrière-plan (fiche n°6).

Ces éléments doivent correspondre aux étapes les plus impactantes, et leur identification nécessite donc un passage en revue des impacts environnementaux de ces étapes (par exemple, à travers les inventaires de cycle de vie (ICV) de la base de données Ecoinvent).

En l'occurrence, après analyse des ICV publiés par Ecoinvent²², les éléments les plus contributeurs au changement climatique²³ sont :

- La consommation de chaleur à partir de charbon pour le recyclage de l'acier, une fois séparé du béton
- La proportion de matière évitée en fin de vie (en particulier la consommation électrique associée)

Dès lors, des scénarios prospectifs peuvent être établis pour ces deux points chauds identifiés préalablement. Il s'agit donc plutôt de la variation des données d'arrière-plan (fiche n°6) plutôt que des données d'activité (fiche n°4) ou des flux élémentaires primaires (fiche n°5).

Le Tableau 17 reprend les trois scénarios du cas d'étude fictif :

- Le scénario 1 reprend les données qui auraient été utilisées en ACV conventionnelle
- Le scénario 2 représente une réduction des consommations en électricité pour la production de matière vierge
- Le scénario 3 représente une réduction des consommations de chaleur pour le recyclage de l'acier

Tableau 17 - Eléments de modélisation affectés principalement par l'ACV dynamique pour le cas d'étude n°1.

Eléments de modélisation affectés	Scénario 1 (conventionnel)	Scénario 2	Scénario 3
Consommation de chaleur lors du recyclage de l'acier à partir de charbon	4.40 MJ/kg	4.40 MJ/kg	2.40 MJ/kg
Consommation en électricité pour la production d'acier vierge dans 50 ans	0.45 kWh/kg <i>mix prospectif</i>	0.37 kWh/kg <i>mix prospectif</i>	0.37 kWh/kg <i>mix prospectif</i>

²² Les données présentées par la suite ont été inspirées des données Ecoinvent (« *steel production, converter, low-alloyed - RER* » pour l'acier vierge et « *steel production, electric, low-alloyed – Europe without Switzerland and Austria* » pour l'acier recyclé) et ont été modifiées à des fins pédagogiques pour faciliter la compréhension de la démarche dynamique et mettre en valeur certaines nuances de l'approche dynamique qui n'auraient pas pu être présentées avec les données telles que publiées par Ecoinvent.

²³ Le changement climatique a été pris comme indicateur d'exemple afin de rendre la démarche compréhensible, mais l'approche devrait être appliquée à chaque catégorie d'impact jugée pertinente.

Ces valeurs représentent des consommations futures et, donc, incertaines. Il est donc recommandé de compléter cette approche par des analyses de sensibilité caractérisant les incertitudes liées au facteur temps qui implique que le futur est incertain et difficile à prédire (fiche n°10).

5. Représentation des résultats pour représenter le décalage des émissions dans le temps (fiche 9)

Enfin, après avoir mesuré les résultats des différents scénarios par étape du cycle de vie, il est recommandé de présenter les résultats finaux de manière dynamique (comme représenté dans la fiche n°9) afin de pouvoir étudier l'évolution temporelle et les émissions décalées dans le temps.

Pour ce faire, les impacts cumulés (*i.e.*, l'impact total est donc représenté par l'impact de la dernière ligne du tableau) sont décomposés selon les étapes établies lors du positionnement des émissions dans le temps, comme dans le Tableau 18.

Tableau 18 – Résultats cumulés du cas d'étude 1 décomposés selon les étapes établies lors du positionnement des émissions dans le temps.

Instant t	Années après t_0	Description	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
t_0	0	Impacts cumulés de la production de l'armature en acier et de la gestion de certaines chutes de production (kg CO ₂ -eq/kg)	0.55	0.55	0.55
t_1	1-75	Impacts cumulés du transport et de l'application de l'armature au bâtiment avec le béton (kg CO ₂ -eq/kg)	0.59	0.59	0.59
t_3	75	Impacts cumulés de la démolition du bâtiment, de la séparation de l'acier du béton, du recyclage, et de l'évitement de la matière vierge associée (kg CO ₂ -eq/kg)	0.13	0.39	0.37

On observe tout d'abord que le scénario 1 représentant l'ACV conventionnelle mesure un impact relativement bas pour l'acier (0.13 kg CO₂-eq contre 0.39 et 0.37 kg CO₂-eq pour les deux autres scénarios). Ceci est lié au fait que l'on considère que l'acier évité dans 50 ans est produit dans les mêmes conditions qu'aujourd'hui. Or, la production de matière vierge dans 75 ans sera décarbonée et aura donc un impact moindre. Le scénario 1 surestime donc les bénéfices du recyclage de l'acier en ramenant les impacts futurs au temps t_0 .

Alors que le scénario 2 permet de mieux représenter la production de matière vierge dans 50 ans, le scénario 3 va un cran plus loin en estimant que, pour le processus de recyclage d'acier dans 50 ans, celui-ci sera optimisé et nécessitera donc moins de chaleur, ce qui réduit légèrement l'impact de l'acier de 0.39 à 0.37 kg CO₂-eq.

En conclusion, ce premier cas d'étude, bien que simplifié à des fins pédagogiques, permet d'illustrer l'application des différents logigrammes et fiches techniques présentées auparavant. Il est néanmoins important de noter que toutes les fiches ne sont pas systématiquement applicables, comme c'est le cas de certaines fiches comme la n°9.

En effet, au vu des scénarios, il est plus simple de discuter des résultats à partir du Tableau 18 plutôt qu'à partir d'un graphe. Etant donné que les impacts sont identiques aux 3 scénarios jusqu'à la 75^{ème} année, le graphe ne permettrait pas de déceler correctement les 3 courbes. Le praticien est donc invité à appliquer ces différentes fiches avec précaution et à toujours mettre en pratique son esprit critique lors de l'application de celles-ci.

3.7.2 Cas 2 : Gestion d'une décharge

Les décharges font souvent face à des enjeux temporels de modélisation en ACV. En effet, les stations d'enfouissement peuvent contenir des déchets contenant certaines substances dangereuses. Ces substances, une fois présentes dans la décharge, peuvent engendrer des effets de lixiviation, se manifestant sur de très longues périodes.

La lixiviation est le processus par lequel les contaminants présents dans les déchets sont dissous par l'eau provenant des précipitations qui s'infiltrer à travers les déchets (phénomène appelé percolation), formant ainsi un liquide appelé lixiviat. Ce lixiviat peut contenir une variété de substances toxiques et polluantes, telles que des métaux lourds, des composés organiques volatils, et d'autres produits chimiques dangereux, tous issus des déchets enfouis initialement.

Le lixiviat représente un risque majeur pour l'environnement car il peut s'infiltrer dans les sols et atteindre les eaux souterraines, entraînant leur contamination. Les impacts environnementaux potentiels de ces processus doivent donc être pris en compte sur des horizons temporels très étendus, parfois plusieurs centaines d'années. Cette nécessité de projection à long terme implique d'intégrer certaines approches dynamiques à l'ACV car il est difficile de prévoir avec précision les conditions futures et les taux de lixiviation. (Guzman-Martinez, et al. 2022)

En particulier, ce deuxième cas étudie l'enfouissement de déchets contenant des substances dangereuses susceptibles de finir dans le lixiviat.

1. Critères pour décider d'engager une approche dynamique ou non

Afin d'évaluer la pertinence ou non d'engager une approche dynamique pour ce cas d'étude, il faut se référer au logigramme de la Figure 9.

En l'occurrence, le système étudié n'est pas réellement susceptible de varier dans le temps étant donné que ces déchets, une fois mis en décharge, ne sont plus soumis à des activités humaines. Alors, comme représenté dans la Figure 27, le praticien doit se poser la question si un aspect du cycle de vie est supérieur à 5 ou 10 ans, ce qui est le cas ici étant donné que l'on considère les effets de lixiviation qui peuvent s'étendre sur plusieurs décennies. En conclusion, il est donc pertinent d'engager une approche dynamique.

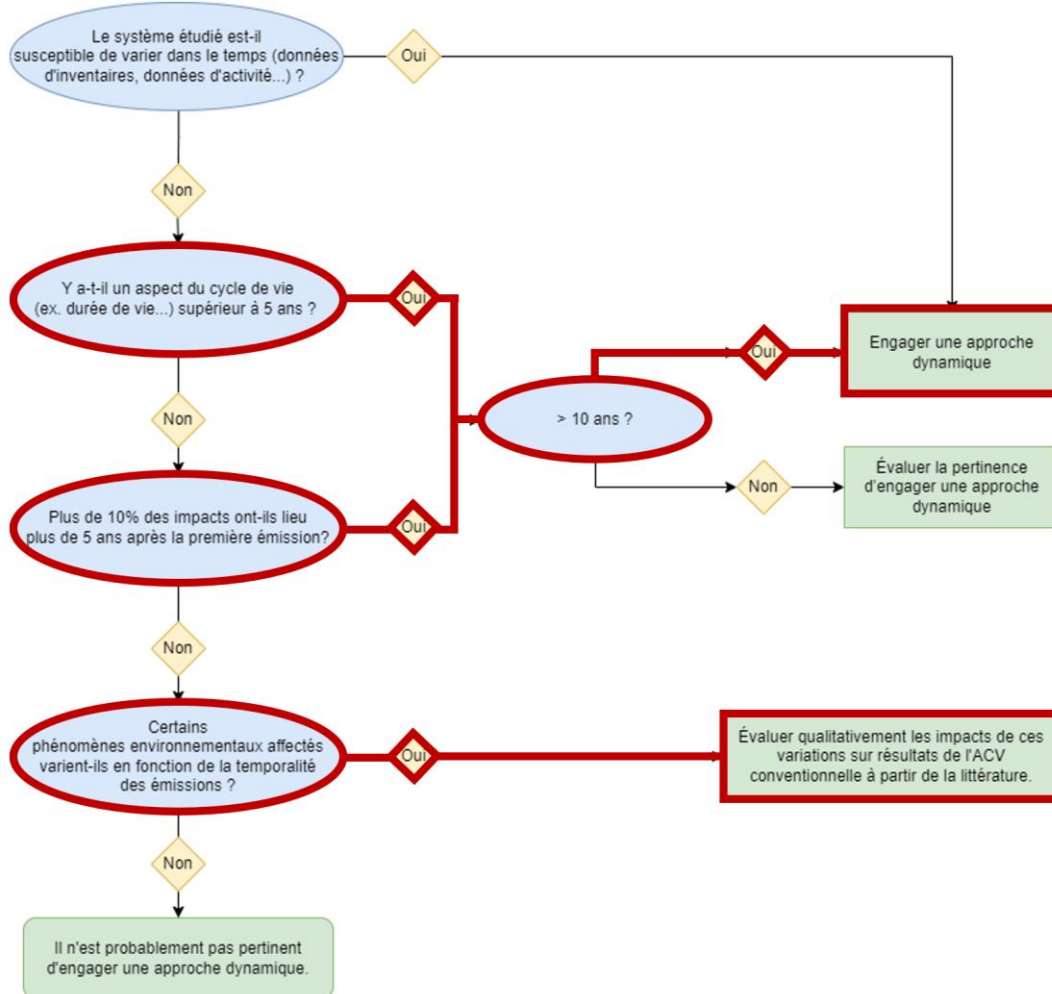


Figure 27 - Logigramme de prise de décision pour l'engagement ou non d'une approche dynamique en ACV appliqué au cas d'étude n°2 portant sur la gestion d'une décharge.

Note : En cas de doute, il est recommandé au praticien d'évaluer les autres questions du logigramme. En l'occurrence, le cas d'étude répond positivement aux deux autres questions du logigramme, ce qui confirme qu'il est nécessaire d'engager une approche dynamique à ce cas-ci, et qu'il faudra évaluer qualitativement les phénomènes environnementaux à partir de la littérature.

2. Identification des fiches techniques pertinentes

Ensuite, le praticien doit réfléchir aux éléments pertinents à intégrer dans son ACV dynamique à partir du logigramme d'aide à la sélection des fiches techniques représenté en Figure 24.

En l'occurrence, pour le présent cas d'étude, comme présenté en Figure 28, il s'avère que 4 critères sont remplis, à savoir :

1. Au moins un aspect du cycle de vie est supérieur à 5 ans : la durée de lixiviation après mise en décharge des déchets.
2. L'écart entre au moins deux émissions du cycle de vie est supérieur à 5 ans : découle du point 1.
3. Certaines données sont susceptibles de varier selon la période étudiée : concerne l'évolution de la lixiviation des déchets dangereux au cours du temps
4. Les résultats sont affectés par l'horizon temporel de la méthode de caractérisation : concerne également les enjeux de toxicité des substances dangereuses libérées par les déchets dangereux

Ainsi, le logigramme de la Figure 28 nous recommande d'appliquer les fiches 1, 4, 5, 7, 8, 9 et 10.

Il est important de noter que la séparation des 10 fiches techniques relève d'un enjeu de pédagogie afin de présenter les actions de manières succinctes au praticien de l'ACV, mais que toute approche dynamique en ACV demande probablement l'application de plusieurs de ces fiches simultanément.

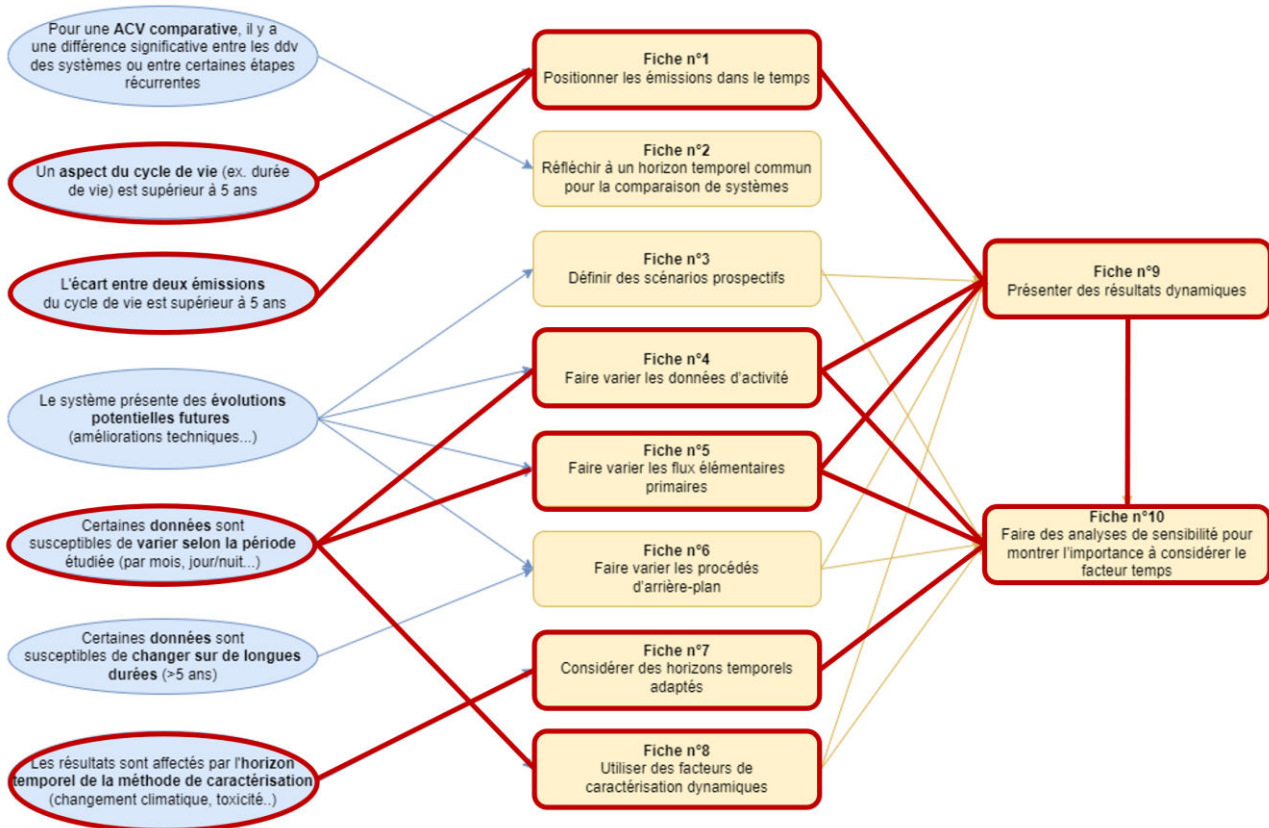


Figure 28 - Logigramme de prise de décision pour l'engagement ou non d'une approche dynamique en ACV appliqué au cas d'étude n°2 portant sur la gestion d'une décharge.

3. Positionnement des émissions dans le temps

Afin de mieux percevoir les enjeux temporels du cas étudié, les émissions principales sont positionnées dans le temps comme le propose la fiche n°1. Le Tableau 19 confirme que l'application de l'approche dynamique est bel et bien pertinente étant donné l'espace entre la première et dernière émission.

En particulier, le temps t_0 représente la mise en décharge du déchet en question. Il est supposé que la décharge étudiée perde son imperméabilité à cause d'une rupture de la membrane inférieure après 50 ans, induisant donc une contamination du sol en dessous de la décharge par lixiviation des substances dangereuses contenues. Après 500 ans, la substance étudiée se dégrade en une autre substance inerte pour l'environnement.

Tableau 19 – Application de la Fiche n°1 sur le positionnement des émissions dans le temps au cas d'étude portant sur la gestion d'une décharge.

Instant t	Années après t_0	Description
t_0	0	Mise en décharge du déchet contenant une substance dangereuse
t_1	50	Perte de la propriété imperméable de la membrane de la décharge Début de la lixiviation de la substance dangereuse
t_2	500	Dégradation de la substance en une autre substance inerte

4. Evaluation de l'applicabilité des fiches techniques sélectionnées

Ce cas d'étude étant plus innovant que le précédent, il est plus difficile de l'appliquer à l'ACV dynamique car la lixiviation engendre des impacts d'écotoxicité, qui sont moins développés dans la littérature (cas d'études, FC, données dynamiques...), et le concept de lixiviation est plus technique à modéliser en ACV et moins étudié dans la littérature.

Ainsi, dans le but de présenter un cas où l'ACV dynamique est plus difficilement applicable, une approche différente est suivie. Dans ce cas-ci, la faisabilité d'application des fiches techniques sélectionnées dans le logigramme de la Figure 28 sont discutées une à une dans le Tableau 20. Cette approche permet au praticien de réfléchir aux éléments dynamiques que ce dernier pourrait malgré tout intégrer à son cas d'étude étant donné la pertinence d'intégrer ces éléments.

Tableau 20 - Discussion de l'applicabilité des fiches techniques sélectionnées au cas d'étude n°2 portant sur la gestion d'une décharge.

Fiche technique	Application au cas d'étude
Fiche n°4 - Faire varier les données d'activité	Non pertinent car pas d'activité humaine après mise en décharge
Fiche n°5 - Faire varier les flux élémentaires primaires	Variation du taux de dégradation de la substance en fonction du milieu récepteur (sol, nappe phréatique...), si disponible dans la littérature
Fiche n°7 - Considérer des horizons de temps adaptés	Considérer des HT courts et longs (ex. 20 et 1000 ans) pour l'évaluation de l'écotoxicité ²⁴
Fiche n°8 - Utiliser des facteurs de caractérisation permettant de prendre en compte la variabilité de l'impact au cours du temps	Fiche pertinente mais non-applicable au vu de la non-disponibilité des FC dynamiques pour l'écotoxicité sur différents HT
Fiche n°9 - Présentation des résultats dynamiques	Difficilement applicable étant donné la difficulté d'accès des FC dynamiques et donc de résultats dynamiques quantitatifs
Fiche n°10 - Faire des analyses de sensibilité pour montrer l'importance à considérer le facteur temps	Toujours applicable pour illustrer les incertitudes des données utilisées

En résumé, il s'avère que la modélisation des enjeux dynamiques de lixiviations associés à une décharge est assez compliquée étant donné la faible disponibilité des données dans la littérature ainsi que dans les bases de données ACV.

Dans ce cas de figure, le praticien de l'ACV est encouragé à réfléchir malgré tout aux éventuels enjeux dynamiques associés au cas d'étude, et d'évaluer les conséquences de manière qualitative ou semi-quantitative, à défaut d'avoir des données utilisables.

Ainsi, le praticien appliquerait donc une ACV conventionnelle à la décharge tout en discutant certaines limites des résultats, en particulier pour l'écotoxicité, en mentionnant les enjeux de lixiviation abordés dans ce cas d'étude. Cela peut être appliqué par exemple à travers des analyses de sensibilité par scénarios en appliquant différents taux de dégradation des substances étudiées en fonction des milieux récepteurs, comme évoqué pour la fiche n°5 dans le Tableau 20.

²⁴ Bien que la méthode UseTox ait introduit différents horizons temporels dans sa version 3.0 (cf. section 0), la méthode paraît encore difficile d'application pour le praticien de l'ACV et ne paraît donc pas pertinente à appliquer pour cette étude plus globale sur le concept d'ACV dynamique.

3.8 Précautions à prendre lors d'une ACV dynamique

3.8.1 Les approches dynamiques trop simplifiées

Il existe un certain nombre de cas pour lesquels il est pertinent d'engager une approche d'ACV dynamique, l'objectif étant de renforcer la pertinence environnementale des cas d'études confrontés à des variabilités temporelles importantes (produits à longue durée de vie, consommation saisonnière d'énergie...) et mal représentées en ACV conventionnelle.

Cependant, en simplifiant trop l'approche, le risque est d'engendrer des conclusions qui vont elles-mêmes à l'encontre des objectifs du développement durable. Il est donc important, lors de l'établissement d'une approche d'ACV dynamique, de bien réfléchir aux conséquences de celle-ci sur les résultats finaux. Il en va de la crédibilité de l'approche dynamique en ACV.

A titre illustratif, prenons le cas de produits à longues durées de vie : les bâtiments. En effet, plusieurs dizaines d'années peuvent s'écouler entre l'étape de construction et de fin de vie d'un bâtiment. C'est pourquoi, il est recommandé, selon les critères établis dans le cadre de cette étude, de réévaluer la prise en compte des enjeux de décalage des émissions dans le temps et d'allocation des bénéfices du recyclage au temps t_0 au moyen d'une approche dynamique, comme évoqué dans les chapitres 2.4.1 et 2.5.

C'est dans ce cadre que la DHUP (Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages) a décidé d'intégrer une approche dynamique dans la réglementation RE2020 du bâtiment en France. Pour rappel, la réglementation environnementale en question est présentée de manière synthétique en annexe 8.1. En résumé, l'approche dynamique de la RE2020 a deux effets notables :

1. Pénaliser les matériaux dont les impacts liés aux procédés de fabrication sont particulièrement importants (ex. acier, béton) et contrebalancés aujourd'hui par la prise en compte des bénéfices du recyclage au temps t_0 ;
2. Favoriser les matériaux de construction biosourcés (ex. bois) en partant du principe que ceux-ci stockent du carbone pendant leur production et tout au long de la durée de vie du bâtiment.

Néanmoins, la RE2020 a été critiquée par certains praticiens de l'ACV lors de sa publication, la jugeant trop simplifiée. En effet, une erreur identique à celle décrite en chapitre 2.3.1 a été commise au niveau de la considération des émissions décalées dans le temps.

Les coefficients de pondération ont été établis sur un horizon temporel de 100 ans à compter de la construction du bâtiment. Or, comme démontré dans la Figure 4, afin de comparer plusieurs bâtiments de durées de vie différentes, il faudrait plutôt considérer un horizon temporel correspondant à la somme de la durée du cycle de vie et de la valeur de l'horizon temporel de l'impact (fixé à 100 ans par les méthodes les plus répandues pour le changement climatique).

En particulier, pour une émission à 50 ans, le facteur correctif est égal à 0.72 au lieu de 0.58 indiqué dans la RE2020, ce qui revient à une surestimation de 35% dans la réglementation. (Ventura and Feraille 2021)

3.8.2 Traiter les incertitudes via une approche par analyse de sensibilité

L'ACV dynamique implique, par définition, de modéliser des éléments temporels futurs et, par conséquent, incertains. Comme mis en exergue à travers la fiche n°10, il est toujours recommandé au praticien d'appliquer des analyses de sensibilité en travaillant par scénarios pour mettre en exergue ces incertitudes, dans le but de gagner en pertinence dans l'évaluation environnementale. Ces analyses de sensibilité peuvent être appliquées au niveau des horizons temporels considérés, des plages de valeurs utilisées pour des données d'activités ou procédés d'inventaires, etc.

Toutefois, il incombe au praticien de l'ACV de peser les avantages potentiels d'une analyse de sensibilité par rapport aux contraintes de temps et de budget disponibles.

4 Limites et recommandations

4.1 Limites dans la pratique de l'ACV dynamique

4.1.1 Manque d'intégration des méthodes numériques en ACV

L'ACV conventionnelle s'appuie sur une vaste quantité de données, englobant tout le cycle de vie, de l'extraction des matières premières à la fin de vie des produits. Avec l'introduction de l'ACV dynamique, la complexité et le besoin en données augmente d'autant plus.

En effet, l'ACV dynamique, étant donné sa définition, multiplie le nombre de points de données à analyser à travers son évaluation dans le temps. Cette multiplication des données nous rapproche du domaine du big data, où les volumes, la variété et la vélocité des informations requièrent des techniques avancées de traitement et d'analyse.

Néanmoins, de manière générale, la communauté de l'ACV n'a pas intégré l'évolution des méthodes numériques. Il faudrait plus d'informaticiens, des mathématiciens et des spécialistes pour aboutir à des modélisations complexes (intégration d'intelligence artificielle...).

De plus, l'approche de l'ACV dynamique n'est pas la même que celle de l'ACV conventionnelle au niveau du concept méthodologique car elle intègre des modélisations numériques. Pour certains académiciens, il ne s'agit pas d'une simple adaptation des outils ACV existants (ex. SimaPro...) mais le changement doit être appliqué à un niveau plus fondamental, voire au niveau de la méthode ACV en tant que telle.

4.1.2 Faible disponibilité d'outils opérationnels

Pour que l'ACV Dynamique soit appliquée par les praticiens, il est important de disposer d'outils opérationnels. Or, à l'heure actuelle, il n'existe pas d'outil permettant de réaliser des ACV Dynamiques complètes. Il existe toutefois quelques outils mentionnés dans le cadre de cette étude qui permettent de dynamiser en partie l'ACV, à savoir :

- Le Climate Change Impact Tool (**CCI-tool**) développé par l'INSA Toulouse qui se focalise exclusivement sur le changement climatique. L'utilisateur doit construire son inventaire sous la forme d'une série temporelle de données (dans Excel). Cette tâche peut être plus ou moins difficile, selon la complexité du système étudié. (Barna 2021)
- L'outil Excel appelé « **dynCO2** » (CIRAIG 2010), développé par le CIRAIG, qui permet de prendre en compte la distribution temporelle des émissions à l'aide d'un inventaire dynamique intégré, pour le changement climatique. (CIRAIG 2010)
- L'outil **ECOFACT**, développé par le bureau d'étude Pré Sustainability, qui permet d'obtenir des données de production et de consommations énergétiques en temps réel selon différents pas de temps (par heure, par jour...). (Pallas 2022)
- Les outils **DyPLCA** et **Temporalis** qui permettent de dynamiser les inventaires de cycle de vie, comme évoqué en fiche n°5, mais qui sont encore en cours de développement et requièrent actuellement des formations pour leur utilisation.

4.1.3 Temps et budget considérables

En complément au point précédent, il est important de noter que la prise en compte des effets dynamiques en ACV nécessite plus de temps et de budget qu'une ACV conventionnelle. Il est important de garder en tête qu'il n'est pas toujours pertinent d'engager une ACV dynamique et que, en cas de pertinence selon les critères établis dans le cadre de cette étude, il est important de déterminer quels aspects de l'ACV doivent être dynamisés.

De plus, l'ACV dynamique est actuellement relativement chronophage par rapport à l'ACV conventionnelle mais, au fur et à mesure, son application deviendra de plus en plus fluide grâce aux retours d'expérience de la communauté scientifique et au développement de méthodologies de plus en plus robustes.

4.1.4 Manque de cas d'études dans la littérature

Comme évoqué dans cette étude, il manque encore d'exemples de cas d'application d'ACV dynamiques dans la littérature permettant d'obtenir une méthode robuste pour l'ACV dynamique.

Le présent rapport tente malgré tout d'établir une première méthodologie à travers les 10 fiches techniques afin de motiver et guider le praticien de l'ACV dans la démarche. Cependant, comme illustré par les cas pratiques, il n'est pas toujours simple d'application.

Ainsi, pour toutes les raisons évoquées dans le cadre de ce rapport, il est nécessaire de motiver la communauté scientifique à engager des approches dynamiques dans leurs ACV, même si celles-ci ne sont que partielles. Cela permet d'adapter les méthodologies en cours de développement et de mettre en valeur certains points bloquants récurrents.

4.2 Recommandations générales lors de la pratique de l'ACV Dynamique

Les différentes recommandations présentées tout au long du rapport sont regroupées ci-dessous par ordre chronologique de la réalisation d'une ACV dynamique. Le praticien de l'ACV est invité à prendre connaissance de ces 5 étapes et de se référer aux chapitres correspondants pour plus de détails.

1. Réaliser un bref état de l'art des pratiques existantes associées au cas d'étude

Afin d'avoir une meilleure vision des enjeux dynamiques associés à son cas étudié, le praticien est invité à se renseigner des cas typiques d'ACV dynamiques existant dans la littérature et, en particulier, de ceux qui pourraient concerner son cas. Pour ce faire, le praticien est invité à partir des éléments abordés dans cette étude au niveau sectoriel (chapitre 2.4.1) et au niveau des catégories d'impact (chapitre 0), ainsi que des différentes sources mentionnées dans la bibliographie.

2. Evaluer la pertinence d'engager une approche dynamique

Le logigramme présenté en Figure 9 permet au praticien de décider s'il est pertinent d'engager une approche dynamique ou non, selon les critères établis dans le cadre de cette étude.

3. Déterminer les fiches techniques pertinentes à appliquer

En cas de pertinence, le praticien est invité à suivre le logigramme de la Figure 24 afin de déterminer quelles fiches techniques pourraient être intéressantes à appliquer à son cas d'étude.

4. Prendre connaissance des fiches techniques et les appliquer au cas étudié

Une fois la sélection parmi les 10 fiches effectuée, le praticien est invité à parcourir chaque fiche avec la note complémentaire afin de mieux comprendre les enjeux, limites et actions pour le praticien.

Il est de la responsabilité du praticien d'adapter l'application de chacune des fiches à son cas étudié. Ce qui ne peut être implémenté au cas étudié doit alors être mentionné comme limite du cas et discuté lors de l'interprétation des résultats, en parallèle des autres limites mentionnées dans les fiches techniques.

5. Discuter des résultats et intégrer des analyses de sensibilité

En fonction de l'application des fiches techniques, le praticien est invité à discuter des résultats et de les positionner par rapport aux différentes limites identifiées.

S'il s'avère que l'ACV dynamique est difficilement applicable au cas étudié avec les moyens existants, le praticien est invité à réaliser des analyses de sensibilité par scénarios afin d'intégrer – de façon imparfaite certes – certains enjeux du dynamisme (horizons temporels, décalage des émissions dans le temps...).

5 Bibliographie

- ADEME, et al. *Guide d'aide à la sélection des méthodes d'évaluation environnementale*. ADEME, 2020.
- Alexandre, Céline, et Rémi Bagard. *Prise en compte de la dimension temps en ACV : Etat de l'art, recommandations et solutions pour une meilleure mise en oeuvre*. ScoreLCA, 2016.
- Balcombe, Paul, Jamie F. Speirs, Nigel P. Brandon, et Adam D. Hawkes. «Methane emissions: choosing the right climate metric and time horizon.» *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2018: 20:1323-1339.
- Barna, Ligia. *Climate Change Impact Tool*. 17 June 2021. <https://www.insa-toulouse.fr/cci-tool/> (accès le June 2024).
- Beloin-Saint-Pierre, Didier, et al. «Addressing temporal considerations in life cycle assessment.» *Science of the Total Environment*, 2020: 743:140700.
- Boesch, Michael Elias, Stefanie Hellweg, Mark A J Huijbregts, et Rolf Frischknecht. «Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) indicators to the ecoinvent database.» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2007: 12(3):181-190.
- Boulay, Anne-Marie, et al. «The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE).» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018: 23:368-378.
- BRGM. *Nappes d'eau souterraine au 1er février 2024*. 2024 Février 2024. <https://www.brgm.fr/fr/actualite/communiqu%C3%A9-presse/nappes-eau-souterraine-au-1er-fevrier-2024> (accès le Mars 13, 2024).
- Cabassud, Nicolas, et al. *Guide RE2020 - Réglementation Environnementale des bâtiments neufs*. Ministère de la transition écologique (MTE) et Cerema, 2020.
- Cardellini, Giuseppe. *Temporalis: an open source software for dynamic LCA*. 2018. <https://github.com/brightway-lca/temporalis> (accès le June 2024).
- Chance, Quentin, Marc Benoît, Vincent Bretagnolle, Jean-Louis Hemptinne, et Agnès Terrieux. *Affichage environnemental : Recommandations pour un dispositif global d'affichage environnemental producteur de sens, fédérateur, et apte à accélérer la transition écologique : Pour des systèmes agricoles et alimentaires soutenables et résilients*. Rapport, CESIAe – Comité d'Expertise Scientifique Interdisciplinaire sur l'Affichage Environnemental, 2023.
- CIRAIG. *dynCO2 : Calculateur d'empreinte carbone dynamique*. 2010. <https://ciraig.org/index.php/fr/project/dynco2-calculateur-dempreinte-carbone-dynamique/> (accès le June 2024).
- Climat.be. *Climat.be - Climat et émissions - Observations en Belgique*. 2022. <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/changements-observees> (accès le Mars 13, 2024).
- Commission Européenne. *Communication de la commission au parlement européen, au conseil européen, au conseil, au comité des régions, au comité économique et social et à la banque européenne d'investissement*. Bruxelles: Commission Européenne, 2018.
- Conseil Européen. *Infographie - Une législation de l'UE sur les matières premières critiques pour l'avenir des chaînes d'approvisionnement de l'UE*. 21 novembre 2023. <https://www.consilium.europa.eu/fr/infographics/critical-raw-materials/> (accès le mars 2024).
- Cucurachi, Stefano, Reinout Heijungs, et Katrin Ohlau. «Towards a general framework for including noise impacts in LCA.» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012: 17:471-487.
- De Caemel, Bernard, Antoine Beylot, et Tom Huppertz. *Méthodes innovantes de comptabilisation des ressources en ACV*. ScoreLCA, 2022.
- DEISO. *Données de base de l'évaluation du cycle de vie vs. Données de premier plan et comment sélectionner la base de données LCI la plus appropriée*. 2024. <https://dei.so/fr/life-cycle-assessment-background-data-vs-foreground-data-and-how-to-select-the-most-appropriate-lci-database/> (accès le June 2024).
- Fantke, Peter, et al. *USEtox@ 2.0 Documentation (Version 1.1)*. <http://usetox.org>, 2017.
- Fantke, Peter, Olivier Jolliet, et Cedric Wannaz. «Dynamic toxicity modelling based on the USEtox matrix framework.» *Abstract book - SETAC Europe 25th Annual Meeting*. SETAC Europe., 2015.
- Forster, P., et al. «The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity.» *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2021: 923-1054.

- Frischknecht, Rolf, Franziska Wyss, Sybille Büsser Knöpfel, Thomas Lützkendorf, et Maria Balouktsi. «Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach.» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015: 20:957-969.
- Guzman-Martinez, Fredy, Julio C. Arranz-Gonzalez, Maria J. Garcia-Martinez, Marcelo F. Ortega, Virginia Rodriguez-Gomez, et Samantha Jimenez-Oyola. «Comparative Assessment of Leaching Tests According to Lixiviation and Geochemical Behavior of Potentially Toxic Elements from Abandoned Mining Wastes.» *Journal of the International Mine Water Association*, 2022: 41:265-279.
- Huijbregts, M.A.J., et al. *ReCiPe2016 v1.1: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level*. Handbook, Bilthoven, the Netherlands: National Institute for Public Health and the environment, 2017, 138-147.
- Huppertz, Tom, Bo P. Weidema, Simon Standaert, Bernard De Caemel, et Elisabeth van Overbeke. «The Social Cost of Sub-Soil Resource Use .» *Resources*, 2019: 8:19.
- Jancovici, Jean-Marc. *Quels sont les gaz à effet de serre ?* 1 Août 2007. <https://jancovici.com/changement-climatique/gaz-a-effet-de-serre-et-cycle-du-carbone/quels-sont-les-gaz-a-effet-de-serre-quels-sont-leurs-contribution-a-leffet-de-serre/> (accès le Mars 28, 2024).
- Joos, F., et al. «Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis.» *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013: 13(5):2793-2825.
- Lawrence, Cathles III M., Larry Brown, Milton Taam, et Andrew Hunter. «A commentary on “The greenhouse-gas footprint of natural gas in shale formations” by R.W. Howarth, R. Santoro, and Anthony Ingraffea.» *Climatic Change*, 2012: 113:525-535.
- MedECC. «MedECC 2020 Résumé à l'intention des décideurs.» *Changement climatique et environnemental dans le bassin méditerranéen – Situation actuelle et risques pour le futur. Premier rapport d'évaluation sur la Méditerranée*, 2020: 35.
- Nathanson, Jerry A. *Encyclopedia Britannica*. 26 December 2023. <https://www.britannica.com/technology/hazardous-waste-management> (accès le July 2024).
- Owsianiak, Mikolaj, et al. «Ecotoxicity characterization of chemicals: Global recommendations and implementation in USEtox.» *Chemosphere*, 2023: 310:136807.
- Pallas, Georgios. *PRé Sustainability - Real-time, large-scale LCA with ECOFACT*. 26 January 2022. <https://pre-sustainability.com/articles/real-time-large-scale-lca-with-ecofact/> (accès le June 19, 2024).
- Peters, Glen. *Cicero - Methane: a climate blind spot?* 25 Mars 2019. <https://cicero.oslo.no/en/articles/methane-a-climate-blind-spot> (accès le Mars 14, 2024).
- RealClimate. *Losing time, not buying time*. December 2010. <https://www.realclimate.org/index.php/archives/2010/12/losing-time-not-buying-time/> (accès le January 2024).
- Recherche), ANR (Agence Nationale de la. *Environmental assessment of Dynamic Processes – considering time dependency in Life Cycle Assessment method – DyPLCA*. 2013. <https://anr.fr/Project-ANR-13-IS09-0007> (accès le June 2024).
- Shah, Viral, et Robert Ries. «A characterization model with spatial and temporal resolution for life cycle impact assessment of photochemical precursors in the United States.» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2009: 14(4):313-327.
- Sharma, Pooja, Surendra Pratap Singh, Sheetal Kishor Parakh, et Yen Wah Tong. «Health hazards of hexavalent chromium (Cr (VI)) and its microbial reduction.» *Bioengineered*, 2022: 13(3):4923-4938.
- Shimako, Allan Hayato, Ligia Tiruta-Barna, Ana Barbara Bisinella de Faria, Aras Ahmadi, et Mathieu Spérandio. «Sensitivity analysis of temporal parameters in a dynamic LCA framework.» *Science of the Total Environment* (Science of the Total Environment), 2018: 624:1250-1262.
- Shimako, Allan Hayato, Ligia Tiruta-Barna, et Aras Ahmadi. «Operational integration of time dependent toxicity impact category in dynamic LCA.» *Science of The Total Environment*, 2017: 599:806-819.
- Sohn, Joshua, Pradip Kalbar, Benjamin Paul Goldstein, et Morten Birkved. «Defining Temporally Dynamic Life Cycle Assessment: A Literature Review.» *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2020: 314-323.
- Su, Shu, Huan Zhang, Jian Zuo, Xiaodong Li, et Jingfeng Yuan. «Assessment models and dynamic variables for dynamic life cycle assessment of buildings: a review.» *Environmental Science and Pollution Research*, 2021: 28:26199-26214.
- van Oers, Laurant, et al. «Top-down characterization of resource use in LCA: from problem definition of resource use to operational characterization factors for dissipation of elements to the environment.» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2020: 25:2255-2273.

- van Oers, Laurant, Jeroen B. Guinée, et Reinout Heijungs. «Abiotic resource depletion potentials (ADPs) for elements revisited—updating ultimate reserve estimates and introducing time series for production data.» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2020: 25:294-308.
- Ventura, Anne, et Adélaïde Feraille. *Recommandations pour l'introduction de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) dans la Réglementation Environnementale (RE) 2020 des bâtiments*. Université Gustave Eiffel, 2021.
- Zieger, Vladimir, Thibaut Lecompte, et Arthur Hellouin de Menibus. «Impact of GHGs temporal dynamics on the GWP assessment of building materials: A case study on bio-based and non-bio-based walls.» *Building and Environment*, 2020: 185:107210.

6 Table des tableaux

TABLEAU 1 - LES 4 TYPOLOGIES D'ACV DYNAMIQUES.....	13
TABLEAU 2 - RESULTATS POUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE (EN KG CO2-EQUIVALENTS) POUR DEUX MATERIAUX DE CONSTRUCTION DIFFERENTS SELON L'HORIZON TEMPOREL CONSIDERE, ISSU DE (ZIEGER, LECOMPTE AND HELLOUIN DE MENIBUS 2020).....	16
TABLEAU 3 - EXEMPLE FICHE N°1 SUR LE POSITIONNEMENT DES EMISSIONS DANS LE TEMPS POUR LE BATIMENT.	38
TABLEAU 4 - EXEMPLE FICHE N°1 SUR LE STOCKAGE DE CARBONE DU BOIS UTILISE DANS UNE CHARPENTE.....	38
TABLEAU 5 – DESCRIPTION DE L’OPERATIONNALISATION DE LA FICHE N°1 - POSITIONNER LES EMISSIONS DANS LE TEMPS.....	39
TABLEAU 6 – DESCRIPTION DE L’OPERATIONNALISATION DE LA FICHE N°2 – REFLECHIR A UN HORIZON TEMPOREL COMMUN POUR LA COMPARAISON DE SYSTEMES.....	41
TABLEAU 7 - EXEMPLE D'ETABLISSEMENT DE SCENARIO PROSPECTIF POUR LA SUBSTITUTION DANS 10 ANS DE L'ACIER PAR UN POLYMERE POUR LA CARROSSERIE D'UNE VOITURE.	43
TABLEAU 8 – DESCRIPTION DE L’OPERATIONNALISATION DE LA FICHE N°3 – DEFINIR DES SCENARIOS PROSPECTIFS...	43
TABLEAU 9 – DESCRIPTION DE L’OPERATIONNALISATION DE LA FICHE N°4 – FAIRE VARIER LES DONNEES D’ACTIVITE	45
TABLEAU 10 – DESCRIPTION DE L’OPERATIONNALISATION DE LA FICHE N°1 - POSITIONNER LES EMISSIONS DANS LE TEMPS.....	47
TABLEAU 11 – DESCRIPTION DE L’OPERATIONNALISATION DE LA FICHE N°1 - POSITIONNER LES EMISSIONS DANS LE TEMPS.....	49
TABLEAU 12 – DESCRIPTION DE L’OPERATIONNALISATION DE LA FICHE N°1 - POSITIONNER LES EMISSIONS DANS LE TEMPS.....	52
TABLEAU 13 – DESCRIPTION DE L’OPERATIONNALISATION DE LA FICHE N°1 - POSITIONNER LES EMISSIONS DANS LE TEMPS.....	54
TABLEAU 14 – DESCRIPTION DE L’OPERATIONNALISATION DE LA FICHE N°1 - POSITIONNER LES EMISSIONS DANS LE TEMPS.....	56
TABLEAU 15 – DESCRIPTION DE L’OPERATIONNALISATION DE LA FICHE N°1 - POSITIONNER LES EMISSIONS DANS LE TEMPS.....	58
TABLEAU 16 – APPLICATION DE LA FICHE N°1 SUR LE POSITIONNEMENT DES EMISSIONS DANS LE TEMPS AU CAS D’ETUDE PORTANT SUR LE STOCKAGE D’ACIER DANS DU BETON PENDANT UNE LONGUE DUREE.	62
TABLEAU 17 - ELEMENTS DE MODELISATION AFFECTES PRINCIPALEMENT PAR L'ACV DYNAMIQUE POUR LE CAS D'ETUDE N°1.	63
TABLEAU 18 – RESULTATS CUMULES DU CAS D’ETUDE 1 DECOMPOSES SELON LES ETAPES ETABLIES LORS DU POSITIONNEMENT DES EMISSIONS DANS LE TEMPS.....	64
TABLEAU 19 – APPLICATION DE LA FICHE N°1 SUR LE POSITIONNEMENT DES EMISSIONS DANS LE TEMPS AU CAS D’ETUDE PORTANT SUR LA GESTION D’UNE DECHARGE.....	67
TABLEAU 20 - DISCUSSION DE L'APPLICABILITE DES FICHES TECHNIQUES SELECTIONNEES AU CAS D'ETUDE N°2 PORTANT SUR LA GESTION D'UNE DECHARGE.....	68

7 Table des figures

FIGURE 1 - REPRESENTATION DES FLUX ELEMENTAIRES ET FACTEURS DE CARACTERISATION DANS LE CAS D'UNE ACV CONVENTIONNELLE ET DYNAMIQUE, AVEC UN EXEMPLE POUR L'UTILISATION DE L'EAU. LE GRAPHIQUE EST ISSU DU BRGM ET REPRESENTE LE NIVEAU DES NAPPES PHREATIQUES EN FRANCE METROPOLITAINE ENTRE JUIN 2023 ET JANVIER 2024 (BRGM 2024).	11
FIGURE 2 - REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DE L'ACV.....	12
FIGURE 3 - RESULTATS D'UNE ACV DYNAMIQUE COMPARANT UN MUR CONSTRUIT EN MATERIAUX BIOSOURCES (EN GRIS) ET CONVENTIONNELS (BETON ET LAINE DE VERRE, EN NOIR) POUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE (EN FORÇAGE RADIATIF), ISSU DE (ZIEGER, LECOMPTE AND HELLOUIN DE MENIBUS 2020).	15
FIGURE 4 - SCHEMA REPRESENTANT LA GESTION DES HORIZONS TEMPORELS EN CAS D'EMISSIONS DECALEES DANS LE TEMPS AU MOYEN D'UN EXEMPLE CONSTITUANT DE FENETRE DE DUREES DE VIE DIFFERENTES.	17
FIGURE 5 - REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA DIFFERENCE ENTRE ACV PROSPECTIVE ET ACV DYNAMIQUE.....	18
FIGURE 6 - SYNTHESE DES APPROCHES DYNAMIQUES CLASSEES PAR TYPOLOGIE ET ACTEUR.	19
FIGURE 7 - SYNTHESE DES PRINCIPALES APPROCHES LES PLUS SOUVENT CITEES PAR LES CHERCHEURS EN ACV DYNAMIQUES POUR LES DIFFERENTS SECTEURS.	21
FIGURE 8 - CONTRIBUTION AU CHANGEMENT GLOBAL DE TEMPERATURE D'UNE TONNE DE GES – METHANE (CH4) EN JAUNE ET DIOXIDE DE CARBONE (CO2) EN BLEU CLAIR – EN FONCTION DE L'ANNEE APRES EMISSION, ISSU DE (JANCOVICI 2007).....	23
FIGURE 9 - LOGIGRAMME D'AIDE A LA PRISE DE DECISION SUR L'APPROCHE DYNAMIQUE EN ACV.	28
FIGURE 10 – REPRESENTATION DE DEUX SCENARIOS QUI ONT LES MEME OBJECTIFS DE REDUCTION D'EMISSIONS MAIS PAS LES MEMES EFFETS TEMPORELS. LA ZONE HACHUREE REPRESENTE LA DIFFERENCES D'EMISSIONS ENTRE LES DEUX SCENARIOS.	33
FIGURE 11 - LES CINQ ETAPES DE REALISATION D'UNE ACV QUI PEUVENT ETRE RENDUES DYNAMIQUES PAR UNE OU PLUSIEURS PRATIQUES.	34
FIGURE 12 - MODELE EXEMPLE DES FICHES TECHNIQUES PORTANT SUR LES APPROCHES DYNAMIQUES.	36
FIGURE 13 - FICHE N°1 – POSITIONNER LES EMISSIONS DANS LE TEMPS	37
FIGURE 14 - FICHE N°2 – REFLECHIR A UN HORIZON TEMPOREL COMMUN POUR LA COMPARAISON DE SYSTEMES....	40
FIGURE 15 - FICHE N°3 – DEFINIR DES SCENARIOS PROSPECTIFS.....	42
FIGURE 16 - FICHE N°4 – FAIRE VARIER LES DONNEES D'ACTIVITE	44
FIGURE 17 - FICHE N°5 – FAIRE VARIER LES FLUX ELEMENTAIRES PRIMAIRES.....	46
FIGURE 18 - FICHE N°6 – FAIRE VARIER LES PROCEDES D'ARRIERE-PLAN	48
FIGURE 19 - FICHE N°7 – CONSIDERER DES HORIZONS TEMPORELS ADAPTES	50
FIGURE 20 – FICHE N°8 - UTILISER DES FACTEURS DE CARACTERISATION DYNAMIQUES.....	53
FIGURE 21 - FICHE N°9 – PRESENTER DES RESULTATS DYNAMIQUES	55
FIGURE 22 - REPRESENTATION DU FORÇAGE RADIATIF INSTANTANE DANS LE TEMPS SUR L'ENSEMBLE DU CYCLE DE VIE DE TROIS TYPES DE MURS (UN CONVENTIONNEL ET DEUX BIOSOURCES), ISSU DE (ZIEGER, LECOMPTE AND HELLOUIN DE MENIBUS 2020).....	56
FIGURE 23 - FICHE N°10 – FAIRE DES ANALYSES DE SENSIBILITE POUR MONTRER L'IMPORTANCE A CONSIDERER LE FACTEUR TEMPS	57
FIGURE 24 - LOGIGRAMME D'AIDE A LA SELECTION DES FICHES TECHNIQUES PERTINENTES LORS D'UNE ACV DYNAMIQUE.	59
FIGURE 25 - LOGIGRAMME DE PRISE DE DECISION POUR L'ENGAGEMENT OU NON D'UNE APPROCHE DYNAMIQUE EN ACV APPLIQUE AU CAS D'ETUDE N°1 PORTANT SUR LE STOCKAGE D'ACIER DANS DU BETON PENDANT UNE LONGUE DUREE.	61
FIGURE 26 - LOGIGRAMME D'AIDE A LA SELECTION DES FICHES TECHNIQUES APPLIQUE AU CAS D'ETUDE N°1 PORTANT SUR LE STOCKAGE D'ACIER DANS DU BETON PENDANT UNE LONGUE DUREE.....	62
FIGURE 27 - LOGIGRAMME DE PRISE DE DECISION POUR L'ENGAGEMENT OU NON D'UNE APPROCHE DYNAMIQUE EN ACV APPLIQUE AU CAS D'ETUDE N°2 PORTANT SUR LA GESTION D'UNE DECHARGE.	66
FIGURE 28 - LOGIGRAMME DE PRISE DE DECISION POUR L'ENGAGEMENT OU NON D'UNE APPROCHE DYNAMIQUE EN ACV APPLIQUE AU CAS D'ETUDE N°2 PORTANT SUR LA GESTION D'UNE DECHARGE.	67
FIGURE 29 - PRINCIPE DE CALCUL DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA RE2020, ISSU DE (CABASSUD, ET AL. 2020).....	79

FIGURE 30 - COEFFICIENT DE PONDERATION DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE POUR L'ACV, ISSU DE
(CABASSUD, ET AL. 2020)..... 80

8 Annexes

8.1 L'approche dynamique de la RE2020

En 2020, la DHUP (Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages) publiait la méthodologie de la nouvelle Réglementation Environnementale des bâtiments neufs, appelée RE2020, dans le but d'orienter les pratiques vers des solutions plus durables pour lutter contre le changement climatique (Cabassud, et al. 2020).

Le principe de calcul des impacts environnementaux de la RE2020 pour les bâtiments est inspiré de la méthodologie de l'ACV, comme représenté en Figure 29. En effet, comme évoqué en section 2.1, les impacts environnementaux sont obtenus en associant données environnementales avec des quantités (ou données d'activités). La RE2020 pondère alors ces données avec un « **facteur d'adaptation** » établi par les développeurs de la méthodologie, qui consiste notamment en la prise en compte d'une approche dynamique pour le changement climatique.



Figure 29 - Principe de calcul des impacts environnementaux de la RE2020, issu de (Cabassud, et al. 2020).

Dans l'établissement du facteur d'adaptation dynamique, la RE2020 définit son approche dynamique comme étant une « prise en compte de la temporalité des émissions et des émissions de carbone à travers le forçage radiatif cumulé 100 ans après l'édification du bâtiment ». En considérant le moment de l'émission, la méthodologie de la RE2020 aura tendance à diminuer l'impact carbone d'un projet qui stocke temporairement des matériaux carbonés.

En pratique, deux facteurs d'adaptation sont définis sous forme de courbe, comme représenté en Figure 30. Deux courbes au pas de temps annuel y sont représentées : une pour les émissions de CO₂ (en bleu), et une pour les émissions de fluides frigorigènes (en orange).

Une émission ayant lieu en début du cycle de vie du bâtiment sera associée à un facteur proche de 1 et, par conséquent, donnera un résultat proche de l'approche statique. Au contraire, une étape de fin de vie après plusieurs dizaines d'années de durée de vie sera associée à un facteur inférieur à 1, ce qui réduit donc l'impact de cette fin de vie, en prenant en compte le fait qu'une certaine quantité de carbone aura été stockée pendant toute la durée de vie du bâtiment.

Ainsi, en se basant sur une démarche scientifique, la RE2020 favorise les matériaux biosourcés stockant du CO₂ tout au long du cycle de vie du bâtiment, alors que les matériaux ayant des procédés de fabrication impactant (ex. l'acier, le béton...) sont défavorisés.

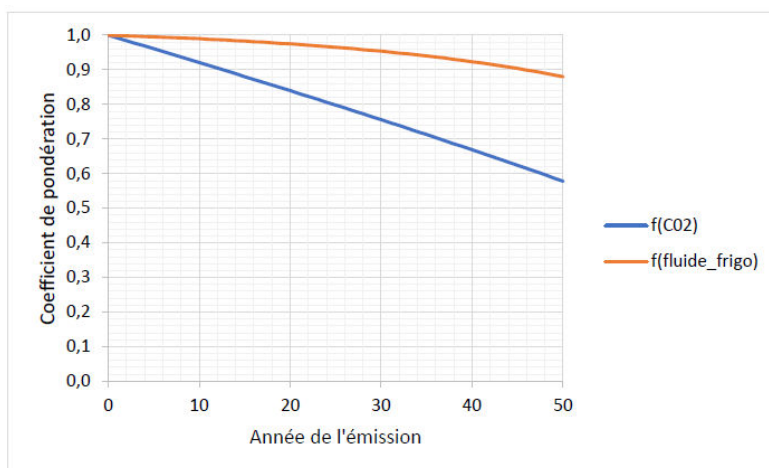


Figure 30 - Coefficient de pondération des émissions de gaz à effet de serre pour l'ACV, issu de (Cabassud, et al. 2020).