

Etude N°2023-02 DIMENSION DYNAMIQUE EN ACV

Synthèse française
Octobre 2024



Version	Octobre 2024	
Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
I.DESCOS, J. VANDEPUTTE, B. DE CAEVEL (RDC Environment)	xx	xx

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.

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. 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 prendre en compte :

- **Décalage temporel des impacts** : Lorsqu'un cycle de vie a des étapes à des moments éloignés dans le temps (produits à longue durée de vie) il y a des effets décalés dans le temps.
- **Évolution temporelle des flux** : Lorsqu'une molécule ou un élément est émis ou prélevé dans l'environnement, il évolue dans le temps (cinétique de dégradation, déplacement et interaction avec des organismes). Cela se traduit par une évolution du facteur de caractérisation (FC).
- **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 (ex : composition des mixes électriques dans le futur, évolutions de technologies...).

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 ».
- **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.
- **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.
- **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.

Par rapport à l'ACV conventionnelle, l'approche dynamique en ACV peut conduire à de fortes différences d'impacts, 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

1.2 Objectifs de l'Étude

Les objectifs de l'étude visent à :

- Dresser un **état de l'art des pratiques** et proposer des recommandations
- 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
- Conduire deux cas d'études
- Proposer un **argumentaire** synthétique pour la normalisation à l'ISO/TC/207/SC5.

2 État de l'art des pratiques actuelles

2.1 Définition conceptuelle de l'approche dynamique en ACV

« **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.** »

Toute ACV devrait être dynamique, sauf quand il n'est pas pertinent de le faire, *i.e.* quand l'apport de l'ACV dynamique n'est pas suffisamment différenciant pour justifier le temps supplémentaire pris par le praticien pour réaliser l'ACV dynamique.

2.2 Typologies d'approches dynamiques

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)**.

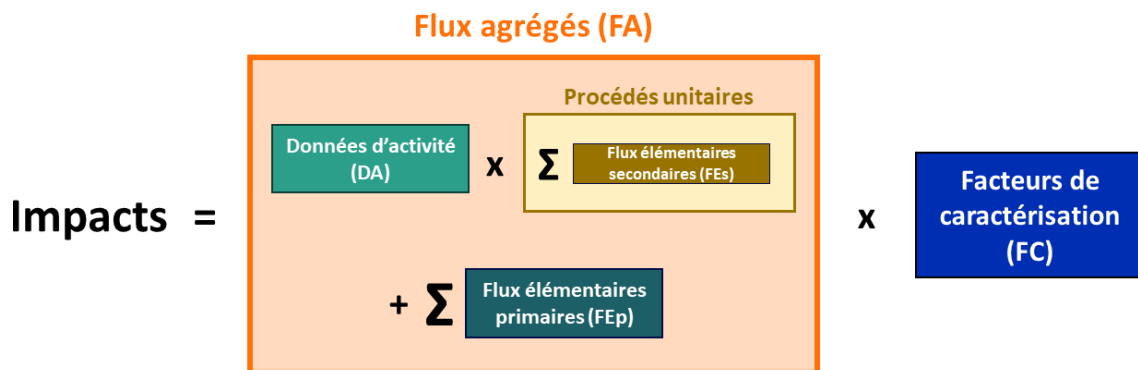


Figure 1 - Représentation schématique des éléments constitutifs de l'ACV.

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. Il convient de s'interroger sur toutes les dimensions pertinentes où intégrer du dynamisme pour garantir une approche correcte de l'ACV dynamique.

Les types d'ACV dynamique possibles sont présentés dans le tableau ci-dessous :

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 développant des modèles de caractérisation	- Distinction hiver/été pour la consommation en eau - Evolution du PRG ¹ du méthane au fil des années

2.3 Enjeux clés

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. Généralement cet horizon temporel est fixé. L'ACV Dynamique apporte des nuances et des variabilités temporelles dans la définition de ces horizons temporels.

2.3.1 Gestion des émissions décalées dans le temps²

Une émission aujourd'hui ne peut être comparée directement avec une émission future ramenée au temps t_0 après émission. En effet, les impacts d'une activité à instant t ont une incidence qui évolue dans le temps. Par exemple, le stockage de carbone dans des matériaux biosourcés à longue durée de vie n'est pas valorisé correctement en ACV conventionnelle³ : elle considère que le bois a capté du CO₂ lors de sa production et qu'il en rejette lors de sa fin de vie du fait de son incinération. 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'atmosphère.

La prise en compte des émissions décalées dans le temps en ACV dynamique mène à des présentations de résultats tels qu'illustrées en Figure .

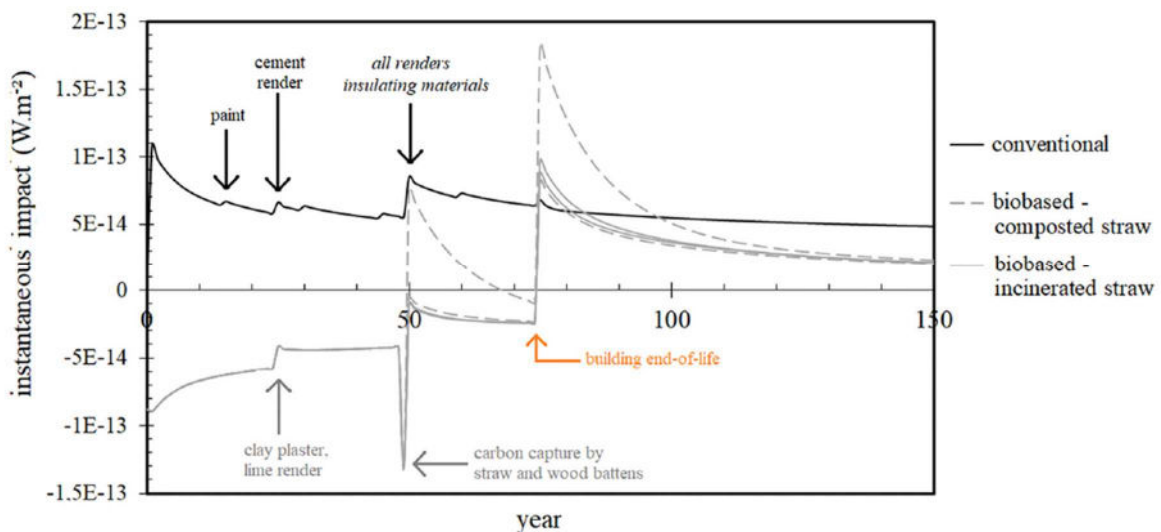


Figure 2 - Résultats d'une ACV dynamique comparant un mur construit en matériaux biosourcés (en gris) et conventionnels (béton et laine de verre, en noir) pour le changement climatique (en forçage radiatif), issu de (Zieger, Lecompte and Hellouin de Menibus 2020).

¹ Le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG).

² Voir aussi l'étude SCORELCA N°2015-01 de la **Prise en compte de la dimension « temps » en ACV**

³ Mis à part lorsque le CO₂ biogénique est pris en compte.

2.3.2 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.

Dans le 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 que le bois a un effet bénéfique sur le changement climatique pendant plusieurs décennies (courbe grise dans la Figure) alors que le béton contribue au réchauffement climatique dès la première année (courbe noire dans la Figure).

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

2.3.3 Horizon temporel sur les facteurs de caractérisation

En ACV conventionnelle, les modèles de caractérisation définissent des facteurs de caractérisation correspondant à une **moyenne d'impact sur une durée**, et sont donc immuables dans le temps.

Par exemple, pour le changement climatique, 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.⁴

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.

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.

En fonction des horizons temporels, les résultats vont fortement varier :

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 CO2-eq/UF)	Biosourcé (kg CO2-eq/UF)
Conventionnelle	100 ans	79.8	26.3
Dynamique	20 ans	60.0	-56.5
	100 ans	70.8	[-22.2 ; -9.8]
	500 ans	71.8	[9.8; 14.3]
	1000 ans	71.2	[11.1; 13.7]

⁴ 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.

2.3.4 Horizon temporel pour une comparaison

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** . 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.⁵

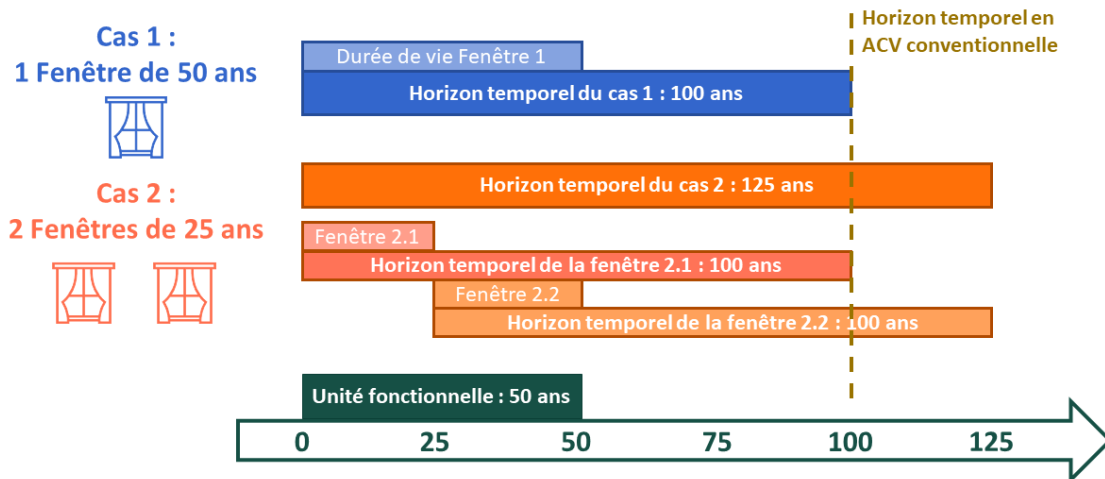


Figure 3 - Schéma représentant la gestion des horizons temporels en cas d'émissions décalées dans le temps au moyen d'un exemple constituant de fenêtre de durées de vie différentes.

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.

2.3.5 Types d'approches dynamiques et d'enjeux - synthèse

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).

Une collaboration entre acteurs est essentielle pour le développement de l'ACV dynamique.

⁵ 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.

Approche dynamique

Typologie

Acteur

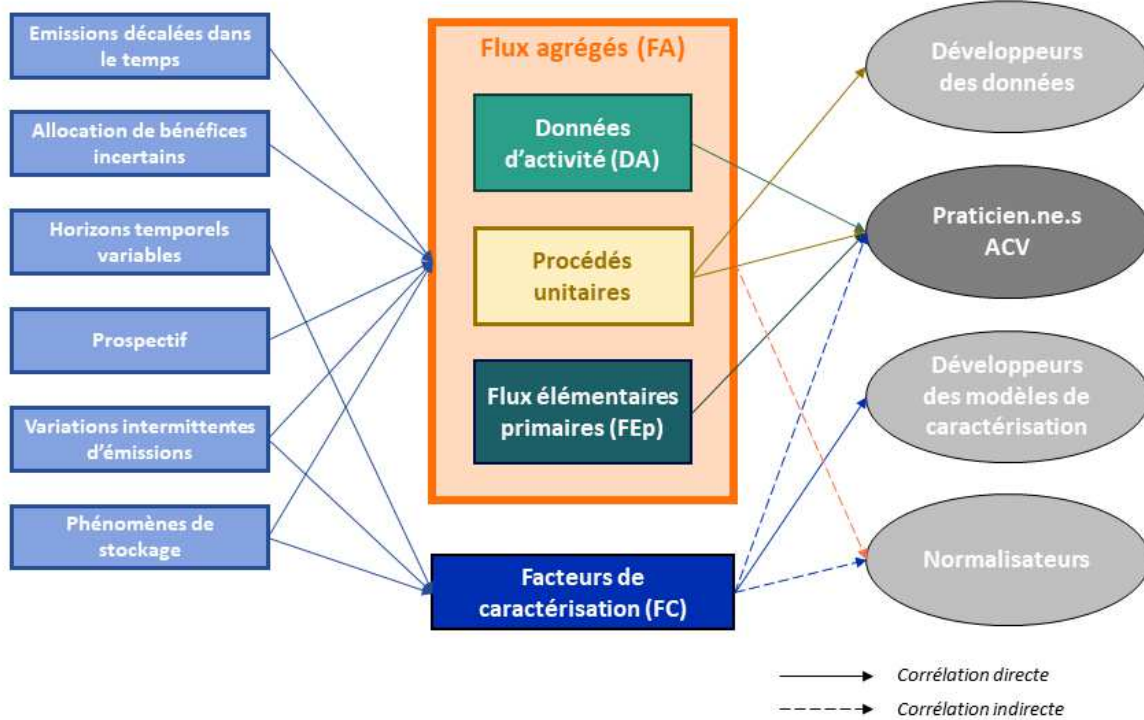


Figure 4 - Synthèse des approches dynamiques classées par typologie et acteur.

2.4 Secteurs d'utilisation de l'approche dynamique

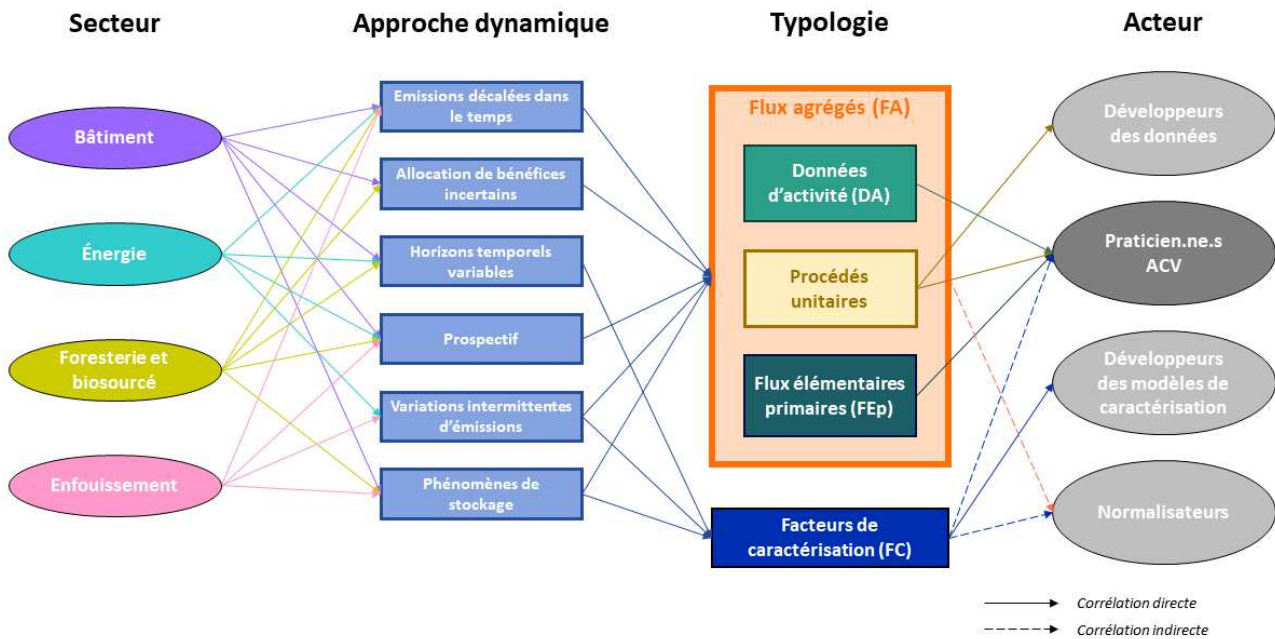


Figure 5 - Synthèse des principales approches les plus souvent citées par les chercheurs en ACV dynamiques pour les différents secteurs.

2.5 Catégories d'impact pertinentes pour l'approche dynamique

Changement climatique

Les points clés où le dynamisme peut être intégré :

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

Toxicité

La pertinence de l'approche dynamique est liée à l'évolution des propriétés de la substance toxique et des conditions d'exposition. Les points clés sont donc de l'approche dynamique :

- **L'horizon temporel considéré pour les substances**
- **L'évolution du facteur de caractérisation dans le temps**

Épuisement 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 technosphère ou dans les déchets. L'approche dynamique en ACV pour l'épuisement des ressources 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** pour refléter cette perte effective de disponibilité

Utilisation de l'eau

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. L'ACV dynamique permet notamment de considérer des approches saisonnières notamment en termes de facteurs de caractérisation.

3 Critères pour conduire une ACV dynamique

Quatre critères principaux ont été identifiés pour conduire une ACV

- Des systèmes qui varient dans le temps
- Un aspect du cycle de vie particulièrement long
- Des impacts significatifs après le temps t_0
- Des phénomènes environnementaux qui varient en fonction de la temporalité des émissions

La Figure reprend proposer des critères pour considérer quand réaliser une ACV dynamique :

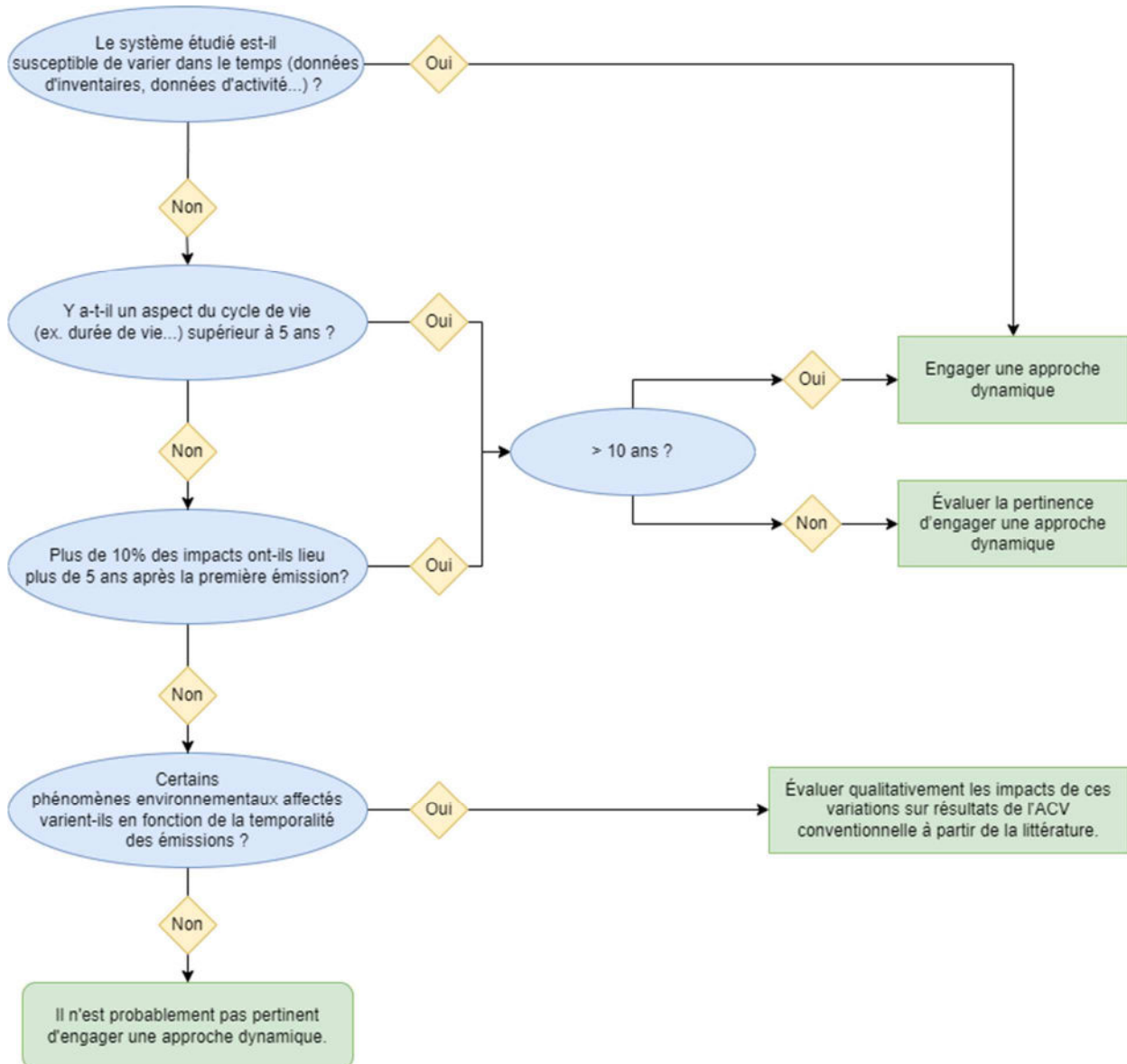


Figure 6 - Logigramme d'aide à la prise de décision sur l'approche dynamique en ACV.

4 Risques de ne pas considérer l'ACV dynamique

4.1 Risque de comparer des matériaux inégalement

Prendre en compte pour comparer les matériaux les différentes étapes permet de considérer :

- **Des phénomènes de stockage ou d'immobilisation de ressources**
- **Des émissions décalées dans le temps, qui auront donc des impacts différents au cours du temps**

4.2 Risque de mauvaises décisions liés à des choix prospectifs

Si l'on néglige de futurs effets on peut faire de mauvais choix.

Exemple :

- *compensation carbone en plantant des arbres, mais sans vraiment s'assurer du temps de pousse de la forêt ;*
- *dans les bâtiments, l'isolation préconisée mais si le mix électrique est décarboné, les enjeux ne seront pas du même ordre.*

4.3 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).

L'approche 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 7**. Deux scénarios partent du même niveau d'émissions en 2024 et atteignent hypothétiquement le même objectif de réduction d'émissions en 2050. Cependant, la mise en œuvre n'a pas lieu au même moment (scénario 1 : immédiat, scénario 2 : tardif). 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.

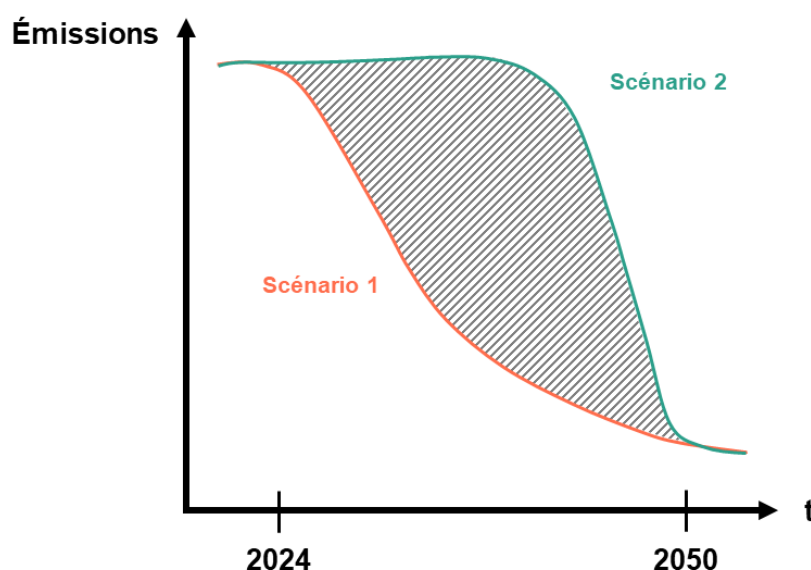


Figure 7 – Représentation de deux scénarios qui ont les mêmes objectifs de réduction d'émissions mais pas les mêmes effets temporels. La zone hachurée représente la différence d'émissions entre les deux scénarios.

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

Comme les horizons temporels sont fixe, l'effet de certaines substances très toxiques à court terme est négligé, et celui d'autres substances toxiques à long terme est surestimé.

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

Les valeurs établies par des modèles de caractérisation tentent de modéliser des enjeux environnementaux, ce qui a pour effet d'induire une certaine simplification.

Certains paramètres nécessitent d'être discutés lors de l'interprétation des résultats. C'est notamment le cas des horizons temporels définis par les modèles de caractérisation.

5 Recommandations : Comment pratiquer l'ACV dynamique ?

10 fiches techniques ont été établies, portant chacune sur une action pour mener l'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
 - Fiche n°9 - Présentation des résultats dynamiques
 - Fiche n°10 - Faire des analyses de sensibilité pour montrer l'importance à considérer le facteur temps

Le logigramme ci-dessous explique quelle fiche utiliser quand :

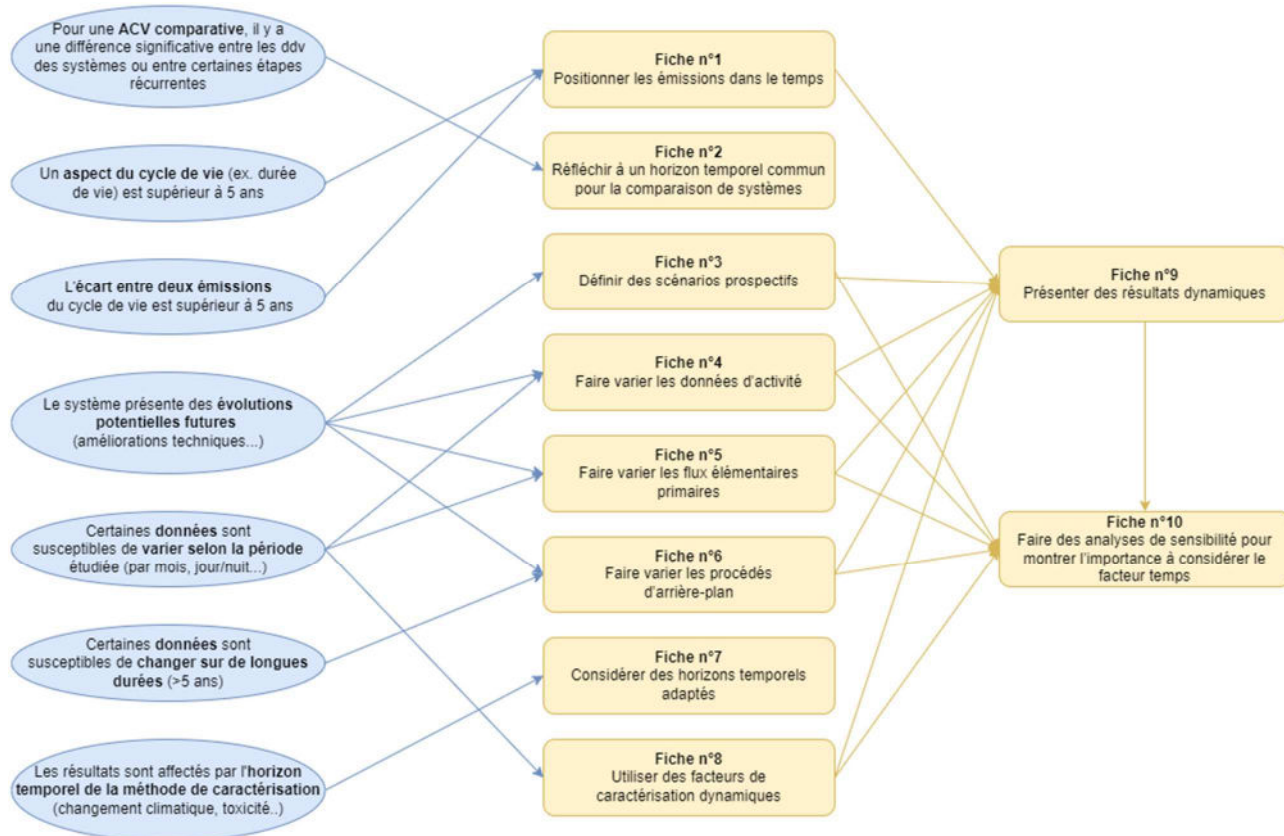


Figure 8 - Logigramme d'aide à la sélection des fiches techniques pertinentes lors d'une ACV dynamique.

6 Précautions à prendre lors d'une ACV dynamique

6.1 Eviter 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

6.2 Ne pas négliger les incertitudes

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.

7 Limites actuelles de l'ACV dynamique

7.1 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 :

- Climate Change Impact Tool (**CCI-tool**) développé par l'INSA Toulouse qui permet de construire son inventaire sous la forme d'une série temporelle de données (dans Excel).
- L'outil Excel appelé « **dynCO2** » 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 **ECOFACT**, développé par le bureau d'étude Pré Sustainability, qui permet d'obtenir des données énergétiques en temps réel selon différents pas de temps (par heure, par jour...). (
- Les outils **DyPLCA** et **Temporalis** qui permettent de dynamiser les inventaires de cycle de vie, mais qui sont encore en cours de développement

7.2 Temps et budget considérables

La prise en compte des effets dynamiques en ACV nécessite plus de temps et de budget qu'une ACV conventionnelle. Il n'est pas toujours pertinent d'engager une ACV dynamique. Si la pertinence est validée, il est nécessaire d'identifier quels aspects de l'ACV doivent être dynamisés.

Si l'ACV dynamique se développe (ainsi que des outils associés), son application deviendra de plus en plus fluide.

7.3 Manque de cas d'études dans la littérature

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.

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.

8. Travaux futurs

Cette étude a permis la réalisation d'une note argumentative sur l'intérêt de prendre en compte l'ACV dynamique dans la normalisation.