HAL open science

Vers une caractérisation spatiotemporelle pour l'analyse du cycle de vie

Didier Beloin-Saint-Pierre

To cite this version:

Didier Beloin-Saint-Pierre. Vers une caractérisation spatiotemporelle pour l'analyse du cycle de vie. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2012. Français. NNT : 2012ENMP0093 . pastel-00857936

HAL Id: pastel-00857936

https://pastel.hal.science/pastel-00857936

Submitted on 4 Sep 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ecole doctorale n° 432 : SMI – Science et Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École nationale supérieure des mines de Paris

Spécialité "Energétique "

présentée et soutenue publiquement par

Didier BELOIN-SAINT-PIERRE

le 3 décembre 2012

Vers une caractérisation spatiotemporelle pour l'analyse du cycle de vie

Directeur de thèse : **Isabelle BLANC**

Jury

M. Dominique MILLET, Professeur des universités, Ecodesign&Optimization of Products, Supméca	Rapporteur
M. Manuele MARGNI, Professeur agrégé, CIRAIG, Polytechnique de Montréal	Rapporteur
M. Reinout HEIJUNGS, Assistant Professor, CML, Leiden university	Examinateur
M. Enrico BENETTO, Scientific Coordinator, CRP, HENRI TUDOR	Examinateur
M. Thierry RANCHIN, Directeur de Recherche ENSMP, OMD, MINES ParisTech	Président
Mme Isabelle BLANC, Maître de Recherche ENSMP, OMD, MINES ParisTech	Examinateur
M. Jean-Michel PARROUFFE, Chef de service réseaux et énergies renouvelables, ADEME	Invité

MINES ParisTech
Equipe OMD (CEP)
1 rue Claude Daunesse, F-06904 Sophia Antipolis Cedex

T H E S E

MINES ParisTech

Vers une caractérisation spatiotemporelle pour l'analyse du cycle de vie

Didier BELOIN-SAINT-PIERRE
30/04/2013

REMERCIEMENTS

Je veux adresser mes remerciements les plus sincères à plusieurs personnes qui m'ont soutenu de différentes manières et sans lesquels je n'aurais pu relever le défi de la thèse.

Merci tout d'abord à Isabelle Blanc de m'avoir offert sa confiance lors de la réalisation de ce projet. Sa disponibilité, sa patience et ses encouragements ont été cruciaux au bon déroulement de la thèse. Je serai toujours reconnaissant de l'opportunité qu'elle m'a offerte.

Merci à tous mes collègues du centre énergétique et procédés de MINES ParisTech qui ont enrichi mon discours et proposé de nombreuses idées intéressantes pour améliorer et approfondir mon sujet de recherche. Plus spécifiquement, je veux souligner l'aide de Lucien Wald, Thierry Ranchin, Philippe Blanc, Pierryves Padey, Pierre Massip, Niels Siebert, Zhipeng Qu et Damien Friot. Merci aussi à MINES ParisTech pour la bourse d'études et la reconnaissance de mon travail. Le travail dans ce centre de recherche a été enrichissant à plusieurs égards.

Merci à mes rapporteurs Dominique Millet et Manuele Margni pour leur réactivité, leurs commentaires et leurs suggestions. Merci aussi à Reinout Heijungs, Enrico Benetto et Jean-Michel Parrouffe pour leur participation à mon jury de thèse et le grand intérêt qu'ils manifestent pour ces travaux.

Merci à l'équipe du CIRAIG pour m'avoir accueilli si amicalement pendant quelques mois, permettant ainsi un échange fructueux, plus particulièrement avec Annie Levasseur et Pascal Lesage.

Je veux finalement remercier mes parents, ma famille et mes amis qui ont toujours trouvé les mots pour m'aider à passer à travers les moments parfois difficiles en m'aidant à prendre du recul.

Encore une fois, merci à tous !

RESUME ETENDU

Cette thèse présente plusieurs propositions de modifications à la méthode analyse du cycle de vie (ACV) afin de simplifier le traitement d'informations liées à la considération de spécificités spatio-temporelles. L'évolution méthodologique présentée concerne surtout la phase de modélisation des systèmes et du calcul d'inventaire. Plus spécifiquement, elle touche les modes de caractérisation spatiotemporelle et la méthode de calcul d'un inventaire du cycle de vie. Ces développements méthodologiques sont discutés qualitativement et quantitativement en fonction de l'utilité de la caractérisation spatiotemporelle offerte par ceux-ci dans de futures études ACV. La discussion est ensuite complétée par la mise en œuvre des développements sur des cas d'études touchant des systèmes de production d'énergie à partir de sources renouvelables.

Le présent document ne se limite toutefois pas à la présentation des différentes propositions de modifications. Il débute par une explication de l'intérêt d'un tel type de développement en fonction d'une analyse générale des méthodes d'évaluation de durabilité environnementale et des systèmes actuels de production d'énergie à différentes échelles. C'est l'importance de la variabilité spatiotemporelle de ces systèmes et des effets d'émissions de polluants sur l'environnement qui constitue la fondation de la problématique de la thèse. C'est dans ce cadre général que la méthode ACV est sélectionnée pour ses avantages lors de l'évaluation de la durabilité environnementale. L'application de la méthode ACV est cependant traditionnellement reconnue comme étant limitée au niveau de la considération des spécificités spatiotemporelles des systèmes et de l'environnement. **L'objectif général de la thèse** est donc de :

Proposer des développements pour la méthode ACV afin de simplifier et expliciter la considération des spécificités spatiotemporelles lors de sa mise en œuvre

Il est considéré que l'intégration de considérations spatiotemporelles dans des études ACV devrait accroitre la représentativité lors de l'évaluation de systèmes de production d'énergie. Ce gain en représentativité est une valeur ajoutée significative qui devrait engendrer des modifications dans la prise de décision pour améliorer l'évaluation de la durabilité environnementale des systèmes de production d'énergie.

Une analyse détaillée de la méthode ACV et de ces développements récents est donc conduite pour atteindre cet objectif. La description de la méthode ACV permet de mieux comprendre comment les spécificités spatiotemporelles sont considérées dans la majorité des études ACV contemporaines. Plusieurs publications discutent aussi de l'intérêt à considérer les spécificités spatiotemporelles aussi bien au niveau de la modélisation des systèmes que pour la modélisation des impacts environnementaux. Certains travaux proposent des avancées dans ce domaine sur les méthodes de modélisation des impacts environnementaux qui est d'ailleurs explorée plus fréquemment que celle de la modélisation des systèmes. La modélisation des systèmes a ainsi été identifiée comme un sujet à explorer pour proposer de nouveaux développements. Il faut d'ailleurs remarquer que le niveau de caractérisation spatiotemporelle actuelle des bases de données utilisées en analyse environnementale ne répond pas au besoin des méthodes de modélisation des impacts environnementaux récemment développées. Il faut également souligner que la question des considérations spatiales est plus avancée que celle des considérations temporelles pour la méthode ACV.

L'analyse détaillée des développements permet finalement de définir une **liste de faiblesses au niveau de la considération des spécificités spatiotemporelles** :

- *L'utilité des modes de caractérisation spatiale et temporelle existants n'est pas analysée.*
- *Aucun mode de caractérisation temporelle n'est utilisé pour décrire les différents systèmes définis dans les bases de données actuelles;*
- *La propagation de la caractérisation temporelle, sous forme de distribution temporelle, lors du calcul d'un inventaire du cycle de vie n'est pas explicitée;*
- *Il n'y a que très peu d'analyses sur le type, le format et la précision des descriptions spatiotemporelles utiles à la modélisation des impacts environnementaux.*

L'analyse des liens entre ces faiblesses au sein de la structure de la méthode ACV a permis d'établir un plan de travail pour la proposition de développements méthodologiques. **Le travail de recherche a été mené selon trois axes** :

1) *L'identification d'un mode de caractérisation spatiotemporelle des bases de données qui offre une information utile pour la modélisation des impacts environnementaux.*

A partir de l'analyse des modes de caractérisation spatiale et temporelle existants, un cadre d'évaluation de ces modes de caractérisation est proposé afin d'évaluer leurs pertinences pour la modélisation des impacts environnementaux et leurs simplicités d'utilisation.

Ce cadre repose sur la définition de deux critères de performance et sur trois conditions de viabilité. La minimisation du temps de travail lors de la description des systèmes et le potentiel de précision de la caractérisation constituent les deux critères de performance. La capacité de gestion de précision variable, la possibilité de propager des caractéristiques spatiotemporelles lors du calcul d'inventaire du cycle de vie et l'utilité du format de caractérisation pour la modélisation des impacts environnementaux sont, quant à elles, les conditions de viabilité de ces modes.

L'analyse des différents modes de caractérisation existants selon ce cadre d'évaluation nous permet de faire une proposition d'un nouveau mode pour la caractérisation spatiotemporelle des sources d'informations. Ce nouveau mode vise à minimiser les effets néfastes de la désagrégation temporelle des systèmes modélisés. **Ce nouveau mode repose sur :**

- *Une caractérisation spatiale qui requiert que chaque flux élémentaire (extraction/émission) soit spécifiquement défini par un compartiment, un sous-compartiment et une région*. La précision spatiale de la région dépend des besoins des méthodes de modélisation des impacts environnementaux spécifiques aux différents flux élémentaires. Une caractérisation spatiale des processus peut aussi servir de balise d'identification pour les dissocier par leur spatialité.

- *Une caractérisation temporelle relative des flux par rapport aux processus.* Ce mode requiert que tous les flux (de processus et élémentaires) relatifs à un processus soient décrits par des distributions temporelles. Ces distributions représentent des mesures et elles doivent donc posséder un support compact. Le temps de référence de ces distributions est fixé arbitrairement à l'instant où le processus offre effectivement son produit. Le pas de temps de ces distributions est représentatif du niveau de précision de la caractérisation temporelle. Chaque valeur par pas de temps représente un flux sur la période qui est définie par ce même pas de temps.

2) *La modification de la méthode de calcul des inventaires du cycle de vie (ICV) pour rendre possible l'utilisation du nouveau format de caractérisation temporelle.*

La définition de la nouvelle méthode de calcul d'inventaire du cycle de vie, nommée ESPA+, offre un moyen de propager les caractéristiques spatiotemporelles définies à partir du mode de caractérisation proposé précédemment. Pour obtenir la méthode ESPA+, **trois modifications** sont effectuées par rapport à la méthode de calcul traditionnelle.

a) *L'utilisation des distributions temporelles pour décrire tous les éléments des matrices et vecteurs* plutôt que des valeurs numériques.
b) *L'utilisation des produits de convolution sur la dimension temporelle* ($*_{temp}$) plutôt que *l'utilisation* des produits matriciels simples entre les différents éléments de l'équation. C'est cet opérateur qui permet une propagation de la caractérisation temporelle relative aux processus plutôt qu'une caractérisation temporelle relative aux scénarios.
c) *La linéarisation du mode de calcul de l'ICV* basée sur la série $1+T+T^2+T^3+\ldots$ à la place de l'inversion de matrice $(1-T)^{-1}$. Cette linéarisation est nécessaire pour l'utilisation du produit de convolution mais entraîne une diminution de la complétude de la modélisation des systèmes.

3) *Test de l'utilité et la pertinence de la mise en œuvre des développements méthodologiques précédents.*

La méthode ACV modifiée est ensuite appliquée pour deux cas d'études de complexité croissante. Le premier cas d'étude offre une description détaillée de la mise en œuvre des développements proposés. Le deuxième exemple permet ensuite d'identifier l'utilité de la considération des spécificités temporelles et l'effort nécessaire au traitement d'un système complexe.

Le premier cas d'étude représente la fabrication d'une installation photovoltaïque avec un système décrit sur deux niveaux. La faible quantité de processus considérés pour la modélisation de ce système permet une description détaillée des étapes de caractérisation spatiotemporelle et du calcul d'ICV. Ce cas d'étude sert surtout à démontrer le fonctionnement du mode de caractérisation spatiotemporelle et de la méthode de calcul ESPA+ pour obtenir un ICV caractérisé au niveau spatiotemporel. Les résultats de ce cas d'étude démontrent l'intérêt de la méthode de calcul ESPA+ pour améliorer les capacités d'analyse à cause des nouvelles informations disponibles dans l'ICV.

Le second cas d'étude propose, non seulement, une caractérisation des systèmes et inventaires du cycle de vie, mais aussi la modélisation dynamique d'impacts sur le réchauffement climatique provenant de la consommation d'eau chaude sanitaire. Seules les spécificités temporelles sont caractérisées dans ce cas d'étude puisque cette catégorie d'impact environnemental a un effet peu variable au niveau spatial. La complexité des systèmes modélisés permet une analyse plus représentative des défis de mise en œuvre lors de l'accomplissement d'une étude ACV. Les résultats de la modélisation dynamique des impacts permettent aussi une discussion sur des notions plus avancées.

Pour conclure :

Le nouveau mode de caractérisation spatiotemporelle proposé et la méthode ESPA+ sont des solutions à la perte de généricité des bases de données qui est induite par une discrétisation spatiotemporelle.

Les développements méthodologiques proposés dans cette thèse permettent finalement d'obtenir des inventaires du cycle de vie caractérisés au niveau spatiotemporel et ceux-ci ouvrent la porte à des études ACV plus représentatives au niveau de la modélisation des systèmes et des impacts environnementaux.

EXTENDED ABSTRACT

This thesis presents several proposals to change the method of life cycle assessment (LCA) to simplify the processing of information related to the consideration of specific spatiotemporal characteristics. The methodological changes apply especially to the system modeling and inventory calculation phase. More specifically, it discusses the spatiotemporal characterization modes for databases and life cycle inventories. These methodological developments are discussed qualitatively and quantitatively in terms of the usefulness of the spatiotemporal characterization they enable for environmental impact assessment. The discussion is then completed by an implementation of developments on case studies involving systems of energy production from renewable sources.

This document is not, however, limited to the presentation of the various proposals for methodological modifications. It begins with an explanation of the value of such changes based on a general analysis of environmental sustainability assessment methods and of current energy systems at different production scales. The importance of spatiotemporal variability of these systems and pollutant emissions is the foundation for the definition of the thesis main question. Within this framework, the LCA method is selected for its advantages in the evaluation of environmental sustainability. The application of the LCA methodology is, however, traditionally recognized as being limited in the consideration of specific spatiotemporal characteristics. **The overall objective of the thesis can then be resumed to**:

Propose developments for the LCA method to simplify and clarify the consideration of specific spatiotemporal characteristics during its implementation

It is expected that the integration of spatial and temporal considerations in LCA studies should increase the representation in the evaluation of systems of energy production. This gain representation is of significant value and should cause changes in decision-making to improve the evaluation of the environmental sustainability for energy production systems.

A detailed analysis of the LCA method and its recent developments is conducted to achieve the main thesis goal. The description of the LCA methodology helps in understanding how the spatiotemporal characteristics are considered in the majority of contemporary LCA studies. Several publications also discuss the interest to consider the spatiotemporal characteristics both in system and environmental impacts modeling. Some studies suggest that the progress in this second area of environmental impact modeling method is explored more frequently than system modeling. This explains why system modeling has been identified as a topic to explore for the proposition of new developments. It should also be noted that the current level of spatial and temporal database characterization does not address the need for environmental impact modeling methods which have been recently developed. It should also be noted that the issue of spatial considerations is more advanced than that of temporal considerations to the LCA method.

Finally, our detailed analysis of methodological developments helps us create a **list of weaknesses** in consideration of spatiotemporal characteristics:

- *The usefulness of existing spatial and temporal characterization modes is not analyzed;*
- *No method of temporal characterization is used to describe the different systems defined in current database;*
- *The use of temporal distribution form in the life cycle inventory calculating step has not been explained;*
- *There is very little analysis on the type, size and accuracy of spatiotemporal descriptions which could be useful for environmental impacts modeling.*

The links between these weaknesses in the structure of the LCA methodology has established a work plan to propose methodological developments. **And so, our research was conducted in three areas**:

1) *The identification of a spatiotemporal characterization mode for databases that provides useful information for environmental impacts modeling.*

From the analysis of existing spatial and temporal characterization modes, an evaluation framework for the characterization is proposed. It assesses their relevance for the modeling of environmental impacts and their simplicities of use.

This evaluation framework is based on the definition of two performance criteria and three viability conditions. Minimization of working time in system description and the potential accuracy of characterization are the two performance criteria. The capacity of managing variable accuracy, the possibility of spreading spatiotemporal characteristics from system description to life cycle inventories and the usefulness of spatiotemporal characteristics for environmental impacts modeling, are the three conditions for the viability of these existing modes.

The analysis of existing characterization modes in accordance to this framework allows us to make a proposal for a new spatiotemporal characterization mode. This new mode aims at minimizing the negative effects of temporal disaggregation for modeled systems. **This new method is based on:**

- *A spatial characterization on each elementary flow (extraction / emission) which uniquely defines a compartment, a sub-compartment and a region.* The spatial accuracy of the region depends on the needs of the selected environmental impacts modeling method for each elementary flow. Process can also be dissociated by their spatiality.

- *Relative temporal characterization of all flows which define a process. This mode requires that all flows (process and elementary) are described by temporal distributions.* These distributions represent measurements and therefore must have a compact support. The reference time of these distributions is arbitrarily set at the moment when the process actually offers its product. The time step of these distributions is representative of the level of accuracy for the temporal characterization. Each value represents a flow quantity over a period (defined by the time step).

2) *The change in the method of calculating life cycle inventories (LCI) which enables the use of the newly proposed format for temporal characterization.*

The definition of the new method of life cycle inventory calculation, named ESPA +, provides a way to spread the spatiotemporal characteristics defined from the previously proposed characterization mode. T**hree changes** are made in relation to the traditional method of calculation for the ESPA+ method.

a) *The use of temporal distributions* to describe all the elements of the matrices and vectors rather than numerical values.
b) *The use of the product of convolution on the time dimension* ($*_{_temp}$) rather than the use of a simple matrix product between the elements of the equation. This operator allows propagation of temporal characterization on process rather than on the temporal characterization scenarios.
c) *The linearization method of calculating the ICV based on the series* 1 + T + T2 + T3 + ... instead of matrix inversion $(T-1)^{-1}$. This linearization is necessary for the use of the product of convolution but causes a decrease in the completeness of systems modeling.

3) *The test of the usefulness and relevance when implementing the previous methodological developments.*

The modified LCA method is applied to two case studies of increasing complexity. The first case study provides a detailed description of the implementation for the proposed developments. The second example is used to identify the value of considering time characteristics and efforts required to process a complex system.

The first case study represents the manufacture of a photovoltaic system and it is described in two levels. The small amount of processes considered for this system modeling allows a detailed description of the steps for spatiotemporal characterization and ICV calculation. This case study is primarily used to demonstrate how to use the spatiotemporal characterization mode and how the ESPA + method enables the calculation of a spatiotemporally characterized LCI. The results of this case study explain our basic interest with the ESPA + method and how it improves the analysis because of the newly available information.

The second case study provides not only a temporal characterization of systems and life cycle inventories, but also the dynamic modeling of global warming impact for hot water consumption in a house. Only the temporal characteristics are characterized in this case study since this environmental impact category has a little spatially variable. The complexity of modeled systems allows for a more representative analysis of the implementation challenges when performing an LCA study. The dynamic environmental impact modeling results also allow for a discussion on more advanced concepts.

To conclude:

The proposed spatiotemporal characterization mode and the ESPA + method are solutions to the loss of genericity in LCA databases which is induced by the spatiotemporal discretization.

The proposed methodological developments of this thesis offer a way to obtain spatiotemporally characterized life cycle inventories and they open the door to more representative LCA studies for both the systems and environmental impacts modeling steps.

TABLE DES MATIERES

Remerciements V
Résumé étendu VII
Extended abstract XI
Table des matières XV
Liste des tableaux XIX
Liste des figures XXI
Lexique XXIII
Glossaire XXVII
Abréviations XXIX

1 Introduction 1-1
1.1 L'évaluation de la durabilité environnementale 1-2
1.1.1 Définition du concept de développement durable 1-2
1.1.2 Définition du concept d'évaluation de la durabilité environnementale 1-3
1.2 Les impacts environnementaux du secteur de l'énergie 1-6
1.3 Spécificités spatiotemporelles de la production d'énergie 1-7
1.4 Méthode pour l'évaluation de la durabilité environnementale 1-10
1.5 Objectif de la thèse 1-11
1.6 Démarche de la thèse 1-12

2 Méthode analyse cycle de vie 2-1
2.1 Description générale de la méthode ACV 2-2
2.1.1 Définition et principes généraux 2-2
2.1.2 Structure de l'ACV 2-3
2.1.3 Résumé et irrégularités dans l'application du cadre méthodologique 2-7
2.2 Historique de développement des considérations spatiotemporelles 2-8
2.2.1 Evolution générale 2-8
2.2.2 Développements au niveau spatial 2-9
2.2.3 Développements au niveau temporel 2-12
2.3 Phase 1 : Définition des objectifs et du champ de l'étude 2-14
2.3.1 Définition des objectifs 2-14
2.3.2 Définition du champ de l'étude 2-14
2.4 Phase 2 : Modélisation du système et calcul d'inventaire cycle de vie 2-17
2.4.1 Modélisation et caractérisation spatiotemporelle des systèmes 2-17
2.4.2 Calcul d'un inventaire cycle de vie 2-23
2.4.3 Forces et faiblesses identifiées pour la deuxième phase de la méthode ACV 2-29
2.5 Phase 3 : Modélisation des impacts environnementaux 2-30
2.5.1 Considérations spatiotemporelles générales pour la modélisation des impacts 2-30
2.5.2 Modélisation d'impacts environnementaux à partir de l'ICV 2-31
2.5.3 Définition des facteurs de caractérisation d'impacts 2-31
2.5.4 Forces et faiblesses identifiées pour la troisième phase de la méthode ACV 2-33
2.6 Résumé du chapitre 2-34

3 Démarche pour le développement 3-1
3.1 Forces et faiblesses des considérations spatiotemporelles 3-2
3.1.1 Description des forces et faiblesses 3-2
3.1.2 Positionnement des forces et faiblesses dans la structure de la méthode ACV 3-3
3.1.3 Identification des freins critiques aux considérations spatiotemporelles 3-4
3.2 Proposition pour le vocabulaire relatif aux considérations temporelles 3-7
3.2.1 Apparition du concept de modèle dynamique 3-7
3.2.2 Modélisation dynamique des systèmes 3-7
3.2.3 Modélisation dynamique des impacts environnementaux 3-7
3.2.4 Discussion sur l'utilisation de l'adjectif dynamique 3-7
3.3 Propositions pour atteindre l'objectif général de la thèse 3-8
3.3.1 Propositions au niveau spatial 3-8
3.3.2 Propositions au niveau temporel 3-9
3.3.3 Résumé des propositions de développement 3-12
3.4 Définition et organisation des objectifs spécifiques de la thèse 3-13
3.4.1 Effets de la structure de la méthode ACV sur l'organisation du travail 3-13
3.4.2 Objectifs spécifiques de la thèse 3-15
3.5 Protocole pour la proposition et vérification de développements 3-18

4 Mode de caractérisation spatiotemporelle 4-1
4.1 Cadre d'évaluation des modes de caractérisation 4-2
4.1.1 Définitions de critères de performance 4-2
4.1.2 Définition des conditions de viabilité d'un mode de caractérisation 4-3
4.1.3 Evaluation des modes à partir du cadre d'évaluation 4-3
4.2 Evaluation des modes de caractérisation spatiotemporelle existants 4-4
4.2.1 Evaluation de modes de caractérisation spatiale 4-4
4.2.2 Evaluation d'un mode de caractérisation temporelle 4-13
4.3 Proposition de nouveaux modes de caractérisation spatiotemporelle 4-18
4.3.1 Proposition d'un mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 2.0 4-18
4.3.2 Proposition d'un mode de caractérisation temporelle relatif des flux 4-21
4.4 Récapitulatif des évaluations des modes de caractérisation 4-26
4.5 Résumé du chapitre 4-27

5 Modification du Calcul d'iCV 5-1
5.1 Utilisation de distributions temporelle pour le calcul d'ICV 5-2
5.1.1 Identification des freins pour l'utilisation de distributions temporelles 5-2
5.1.2 Mise en œuvre de la méthode ESPA pour le calcul d'ICV 5-5
5.2 Méthode ESPA+ pour le calcul d'ICV 5-7
5.2.1 Description des entrées pour l'étape du calcul d'ICV 5-7
5.2.2 Equation du calcul d'ICV spatiotemporel 5-9
5.2.3 Résultats du calcul d'un ICV caractérisé au niveau spatiotemporel 5-10
5.3 Nouvelle méthode *ESPA+* 5-12

6 Cas d'études pour la production d'énergie 6-1
6.1 Sélection des cas d'études pour tester les développements 6-2
6.1.1 Choix du domaine de la production d'énergie par des sources renouvelables 6-2
6.1.2 Choix des développements à tester 6-2
6.1.3 Intérêt pour la simplification des cas d'étude 6-3
6.1.4 Choix des cas d'étude 6-4
6.2 Cas d'étude #1 : Installation photovoltaïque simplifiée 6-5
6.2.1 Description générale du scénario 6-5
6.2.2 Utilisation du mode de caractérisation spatiotemporelle 6-6
6.2.3 Calcul à partir de la méthode ESPA 6-8
6.2.4 Résultats 6-10
6.2.5 Analyse des résultats 6-11
6.3 Cas d'étude #2 : Installation solaire thermique 6-12
6.3.1 Description générale du cas d'étude 6-12
6.3.2 Modélisation des systèmes 6-14
6.3.3 Calcul de l'ICV à partir de la méthode ESPA+ 6-20
6.3.4 Modélisation dynamique du réchauffement climatique 6-21
6.3.5 Analyse des résultats de modélisation d'impacts environnementaux 6-24
6.4 Résumé du chapitre 6-28

7 Conclusion 7-1
7.1 Développements méthodologiques 7-2
7.1.1 Proposition d'un mode de caractérisation spatiotemporelle 7-2
7.1.2 Modification de la méthode de calcul standard des ICVs 7-3
7.2 Mise en œuvre des développements méthodologiques 7-4
7.2.1 Confirmation de conclusions précédentes 7-4
7.2.2 Nouvelles conclusions 7-4
7.3 Conclusion générale 7-5
7.4 Perspectives de recherche 7-6
7.4.1 Incertitude et variabilité 7-6
7.4.2 Collecte de données 7-6
7.4.3 Paramètres nécessaires à la modélisation des impacts environnementaux 7-7
7.4.4 Gestion des informations décrivant le système analysé 7-7
7.4.5 Interopérabilité des sources d'information 7-7

ANNEXE 1 : Production d'énergie A1-1
ANNEXE 2 : METHODE perspective cycle de vie A2-1
ANNEXE 3 : références méthode ACV A3-1
ANNEXE 4 : Champ de l'étude A4-1
ANNEXE 5 : liste et description de BDDs A5-1
ANNEXE 6 : théorie du calcul d'ICV A6-1
ANNEXE 7 : Caractérisation spatiale de l'ICV (Méthode de Mutel & Hellweg) A7-1
ANNEXE 8 : Distributions temporelles A8-1
ANNEXE 9 : exemple de fiches de données A9-1
ANNEXE 10 : cas d'étude #1 ..... A10-1
ANNEXE 11 : Cas d'étude #2 ..... A11-1

Bibliographie B-1

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1 :

Tableau 1-1 : Liens entre la méthode ACV et l'évaluation de la durabilité environnementale 1-11

Chapitre 2 :

Tableau 2-1 : Publications sur les considérations spatiales et temporelles pour l'ACV 2-8
Tableau 2-2 : Publications considérant la variabilité spatiale 2-9
Tableau 2-3 : Compartiments et sous-compartiments décrivant les flux élémentaires. 2-20
Tableau 2-4 : Caractérisation spatiale dans ecoinvent v.3.0..... 2-21

Chapitre 3 :

Tableau 3-1 : Panorama méthodologique pour la considération des spécificités spatiales 3-2
Tableau 3-2 : Panorama méthodologique pour la considération des spécificités temporelles 3-3
Tableau 3-3 : Proposition de développements méthodologiques retenus dans la thèse 3-12
Tableau 3-4 : Protocole de développement pour considérer les spécificités spatiotemporelles..... 3-18

Chapitre 4 :

Tableau 4-1 : Evaluation des modes de caractérisation spatiale existants..... 4-11
Tableau 4-2 : Evaluation du mode de caractérisation temporelle existant 4-17
Tableau 4-3 : Evaluation des nouveaux modes de caractérisation spatiale et temporelle 4-25
Tableau 4-4 : Comparaison des différents modes de caractérisation présentés dans le chapitre 4..... 4-26

Chapitre 5 :

--

Chapitre 6 :

Tableau 6-1 : Description des flux définissant une fiche de données pour le cas d'étude #1 6-6
Tableau 6-2 : Description des flux élémentaires des « sous-processus » pour le cas d'étude #1 6-7
Tableau 6-3 : Liste des systèmes à modéliser pour le cas d'étude #2 6-19
Tableau 6-4 : Résultats de l'impact cumulatif relatif à l'horizon de 100 ans pour le cas d'étude #2 . 6-23

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 :

Figure 1.1 : Schéma conceptuel DPSIR 1-4
Figure 1.2 : Carte mondiale de la moyenne annuelle d'irradiation solaire..... 1-8
Figure 1.3 : Efficacité de conversion d'énergie de différentes cellules photovoltaïques 1-9

Chapitre 2 :

Figure 2.1 : Structure de la méthode ACV 2-3
Figure 2.2 : Schéma simplifié de la structure d'un système. 2-15
Figure 2.3 : Schéma d'un exemple d'un système de production d'électricité. 2-18
Figure 2.4 : Propagation de la caractérisation spatiale par la méthode de Mutel et Hellweg (2009) . 2-28

Chapitre 3 :

Figure 3.1 : Description de la structure de la deuxième phase de la méthode ACV 3-13

Chapitre 4 :

Figure 4.1 : Description du format d'une distribution temporelle relative..... 4-14
Figure 4.2 : Description de différents flux avec le mode de caractérisation temporelle relative. 4-22

Chapitre 5 :

Figure 5.1 : Recadrage de la caractérisation temporelle relative pour le cycle de vie 5-3
Figure 5.2 : Description graphique de la structure de la matrice environnementale $\mathbf{E}$..... 5-7
Figure 5.3 : Description graphique de la structure de la matrice technologique $\mathbf{T}$..... 5-8
Figure 5.4 : Description graphique de la structure du vecteur de référence r 5-9
Figure 5.5 : Proposition de format pour un ICV caractérisé au niveau spatiotemporel 5-10

Chapitre 6 :

Figure 6.1 : Processus considérés pour la fabrication d'une installation PV..... 6-5
Figure 6.2 : Distribution temporelle de l'appel d'onduleurs sur le cycle de vie de l'installation PV. . 6-7
Figure 6.3 : Distributions temporelles des résultats de l'ICV caractérisé au niveau spatiotemporel . 6-10
Figure 6.4 : Distributions pour la consommation journalière moyenne d'ECS 6-14
Figure 6.5 : Consommation d'énergie thermique pour les installations non solaires..... 6-15
Figure 6.6 : Consommation d'énergie thermique pour les installations solaires..... 6-16
Figure 6.7 : ICVs caractérisés au niveau temporel pour les systèmes :..... 6-21
Figure 6.8 : Impact radiatif de deux scénarios 6-21
Figure 6.9 : Impact cumulatif de deux scénarios..... 6-22
Figure 6.10 : Impact cumulatif relatif pour les scénarios I-EL et I-ST+GN 6-24
Figure 6.11 : Impacts cumulatifs relatifs pour les scénarios des catégories I-EL et I-ST+EL 6-26
Figure 6.12 : Impact cumulatif relatif de I-GN et I-ST+GN en fonction de la dynamisation 6-27

LEXIQUE[i]

Activité humaine :

Ensemble des processus anthropogéniques et des liens (flux de processus) qui les relient. Ce qui ne nécessite pas l'intervention humaine est à l'extérieur de cet ensemble.

Agrégation :

Action de regrouper des processus selon certains domaines. Exemple : l'agrégation spatiale de la production d'électricité peut se faire pour un pays qui devient le processus du mix énergétique.

Base De Données (BDD) :

Ensemble de données se rapportant à la modélisation des différents processus de l'activité humaine.

Besoin humain :

Il s'agit du regroupement des produits, services et systèmes qui sont nécessaires pour l'activité humaine telle qu'elle existe aujourd'hui.

Compartiment/Sous-compartiment :

Un compartiment est un milieu comme l'eau, l'air ou le sol. Les sous-compartiments représentent des caractéristiques importantes de ces milieux pour la modélisation de certains impacts environnementaux.

Comptabilité environnementale :

Comptabilité qui considère les flux de matières entre l'activité humaine et l'environnement. Les valeurs comptabilisées peuvent se présenter sous différents formats, mais elles doivent représenter des flux de matière ou des flux entre des processus de l'activité humaine.

Discrétiser/Discrétisation :

Action de diviser. C'est l'inverse de l'agrégation. Exemple : Il est possible de discrétiser le mix énergétique d'un pays au niveau spatial en définissant l'emplacement des centrales le constituant.

Dynamiser/Dynamisation :

Action de caractériser au niveau temporel. Ce terme est surtout utilisé pour indiquer le pourcentage des informations d'un ICV qui sont caractérisées au niveau temporel.

Emission :

Flux de substances allant de l'activité humaine vers l'environnement.

Etape :

Premier niveau de division des quatre phases de la méthode ACV. Exemple : La phase de modélisation des systèmes et du calcul d'ICV se divise entre l'étape de modélisation des systèmes et l'étape du calcul d'ICV.

Etude ACV :

Ouvrage présentant le travail accompli lors de l'évaluation des impacts environnementaux de différents scénarios pouvant répondre à un même besoin.

[i] Répertoire de mots avec un sens propre pour l'auteur.

Evaluation de la durabilité environnementale :

Description quantitative et qualitative de la viabilité d'un choix par rapport à ces effets sur la qualité de l'environnement dans le présent et le futur.

Evaluation équitable :

Comparaison de systèmes considérant des aspects équivalents en détail et parfois en quantité.

Extraction :

Flux de substances allant de l'environnement vers l'activité humaine.

Généricité : La généricité d'un processus élémentaire indique, de manière qualitative, le niveau potentiel de réutilisation de ce même processus pour la modélisation de différents systèmes et au sein d'une même chaîne de production.

Incertitude :

Erreur évaluée dans une mesure

Infrastructure :

Type de processus de l'activité humaine qui représente des systèmes importants à l'échelle humaine tant au niveau temporel que spatiale.

Méthode :

Ordre de travail permettant de conduire à un certain objectif.

Méthode ACV :

Liste des principes, méthodes et étapes à suivre pour accomplir une étude ACV.

Outil d'aide à la décision qui permet d'avoir une vue d'ensemble sur les impacts environnementaux de produits ou de services. Cette méthode, régie par l'organisation internationale des standards (ISO), permet d'évaluer les conséquences environnementales d'un produit, service ou système sur l'ensemble de son cycle de vie. (Jolliet *et al*. 2010)

Mode de caractérisation spatiale/temporelle/spatiotemporelle :

Forme particulière de caractérisation spatiale/temporelle/spatiotemporelle pour les données qui servent à faire la modélisation de différents flux de systèmes dans le cadre d'une modélisation ACV

Modélisation ACV :

Combinaison des phases 2 et 3 de la méthode ACV. Il s'agit donc d'une combinaison des étapes de modélisation des systèmes et de modélisation des impacts environnementaux.

Modélisation dynamique des impacts environnementaux :

Modélisation des impacts environnementaux qui prend en considération la modification temporelle des réponses de l'environnement face à différents flux élémentaires.

Modélisation dynamique des systèmes :

Modélisation des processus et flux les liants qui prend en considération la modification temporelle des processus.

Modélisation systémique :

Modélisation qui définit clairement le système considéré par la description explicite des limites du système.

Puits de carbone :

Réservoir, naturel ou artificiel, qui absorbe du carbone qui est, au départ, dans l'atmosphère.

Energie renouvelable :

Forme d'énergie dont la consommation ne diminue que très faiblement la ressource disponible à l'échelle humaine.

Représentativité :

Niveau de correspondance à la réalité qui pourrait être mesurée.

Scénario :

Il s'agit d'une description d'un déroulement préétabli pour répondre à un besoin. Il est spécifique à un cadre spatiotemporel spécifique. Il peut exister plusieurs scénarios décrivant un même système.

Spatialité :

Description spécifique de la caractéristique spatiale d'un processus.

Spatiotemporel :

Relatif à la fois au temps et à l'espace. Une caractérisation spatiotemporelle donne donc une description des moments et lieux spécifiques.

Système :

Combinaison de processus et des flux les reliant qui permet la production d'un produit ou service. Les processus sont spécifiques au système, mais les caractéristiques de ces processus peuvent varier.

Système actif :

La majorité des flux élémentaires provenant de ce type de système proviennent des processus de production.

Système complexe :

Système décrit par une multitude de processus.

Système passif :

La majorité des flux élémentaires provenant de ce type de système proviennent des processus décrivant les installations nécessaires à la production.

Système simple :

Système décrit par une faible quantité de processus.

Temporalité :

Description spécifique de la caractéristique temporelle d'un processus.

Variabilité :

Qui définit le niveau de variation d'un paramètre qui sert à décrire quelque chose.

GLOSSAIRE[i]

Analyse Cycle de Vie (ACV) :

Compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie. (ISO 14 040)

Anthropogénique :

Qui est causé ou généré par l'humain.

Champ de l'étude :

Cadre et hypothèses qui doivent être décrits avant de faire la modélisation des systèmes et des impacts environnementaux dans le cadre d'une étude ACV.

Complétude :

Une ACV prend en considération tous les attributs ou aspects de l'environnement naturel, de la santé humaine et des ressources. En considérant, en une seule étude et dans une perspective transversale, tous ces attributs ou aspects, on peut identifier et évaluer les compromis possibles. (ISO 14 040)

Corrélation :

Relation réciproque entre deux variables

Emissions :

Emissions dans l'air et rejets dans l'eau et le sol. (ISO 14 040)

Extractions :

Substances extraites de l'environnement et utilisées par différents processus de l'activité humaine.

Facteur de caractérisation (FC) :

Facteur établi à partir d'un modèle de caractérisation qui est utilisé pour convertir les résultats de l'inventaire du cycle de vie en unité commune d'indicateur de catégorie. (ISO 14 040)

Valeurs permettant de définir des extractions ou émissions de substances sous une base commune qui se réfère à l'effet de ces substances sur la stabilité de l'environnement.

Fiche de données :

Un document ou un fichier avec des informations utiles à la réalisation d'une étude ACV pour un produit ou processus spécifique. Cette fiche offre des métadonnées et des quantités de flux décrivant les liens avec d'autres processus. (Sonnemann *et al*. 2011)

Flux de processus :

Processus entrant ou sortant d'un système de processus en direction d'un autre. (ISO 14 040)

Flux de référence :

Mesure des extrants des processus, dans un système de produits donné, nécessaire pour remplir la fonction telle qu'elle est exprimée par l'unité fonctionnelle. (ISO 14 040)

[i] Il s'agit d'un vocabulaire du domaine technique de la méthode ACV

Flux élémentaire :

Matière ou énergie entrant dans le système étudié, qui a été puisée dans l'environnement sans transformation humaine préalable, ou matière ou énergie sortant du système étudié, qui est rejetée dans l'environnement sans transformation humaine ultérieure. (ISO 14 040)

Flux reliant les processus à l'environnement. Il s'agit donc des flux décrivant les extractions et émissions de différentes substances qui proviennent respectivement de l'environnement et de l'activité humaine. Les valeurs de ces flux se retrouvent dans la matrice environnementale (intervention) qui est décrite par le symbole **E**. (Jolliet *et al*. 2010)

Inventaire cycle de vie (ICV) :

Phase de l'analyse du cycle de vie impliquant la compilation et la quantification des intrants et des extrants, pour un système de produits donné au cours de son cycle de vie. (ISO 14 040)

Spécificité de ce document : le terme ICV sert à décrire la liste des flux élémentaires liés au cycle de vie d'un scénario plutôt que faire référence à une des phases de la méthode ACV.

Gaz à effet de serre (GES) :

Constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, qui absorbent et émettent un rayonnement à des longueurs d' onde données du spectre du rayonnement infrarouge thermique émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. (IPCC, 2007)

Méta-information (métadonnées) :

Information qui définit et décrit d'autres données et processus. (Sonnemann *et al*. 2011)

Perspective du cycle de vie :

L'ACV prend en considération l'ensemble du cycle de vie d'un produit, de l'extraction et de l'acquisition de la matière première, à l'utilisation, au traitement en fin de vie et à l'élimination finale des déchets en passant par la production d'énergie et de matière et la fabrication. Au travers d'une telle perspective systématique, le déplacement de charges environnementales potentielles entre les différentes étapes du cycle de vie ou entre des processus particuliers peut être identifié et évité. (ISO 14 040)

Processus :

Ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforme des intrants en extrants. (ISO 14 040)

Description d'une partie de l'activité humaine dont le périmètre est défini de telle manière qu'il est nécessaire de lier plusieurs de ces processus pour modéliser un système.

Processus parent :

Processus qui définit un cadre pour une famille de processus. (Weidema *et al*. 2012)

Processus enfant :

Processus dont le cadre dépend d'un processus parent. (Weidema *et al*. 2012)

Unité fonctionnelle (UF) :

Performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie. (ISO 14 040)

Grandeur quantifiant la fonction du système, le service offert, et sur la base de laquelle les scénarios sont comparés. On utilisera le sigle UF pour y référer dans le texte. (Jolliet *et al*. 2010)

ABREVIATIONS

ACV : Analyse du cycle de vie

ACVI : Evaluation de l'impact sur le cycle de vie

BDD : Base de données

EJ : Eta joules

FC : Facteur de caractérisation

GES : Gaz à effet de serre

ICV : Inventaire du cycle de vie

kW_c : Kilo watt crête

MJ : Méga joules

UF : Unité fonctionnelle

Spécifique aux indices du chapitre 3 :

SG- : Spatial général

SP*x*- : Spatial phase ***x***

TG- : Temporel général

TP*x*- : Temporel phase ***x***

1 INTRODUCTION

Cette thèse a pour objet la modélisation environnementale des impacts des systèmes énergétiques renouvelables. Elle propose des développements méthodologiques pour améliorer la modélisation des systèmes au point de vue environnemental. La méthode de modélisation choisie, l'analyse cycle de vie (ACV), est limitée, notamment du point de vue de la représentativité spatiotemporelle des systèmes considérés.

Dans cette thèse, nous explorons certaines de ces limites et proposerons des solutions pour favoriser l'évaluation de la durabilité environnementale des systèmes complexes du secteur de la production d'énergie. Plus spécifiquement, ces développements méthodologiques doivent permettre une plus grande représentativité de la modélisation lors de l'évaluation de systèmes de production d'énergie à partir de sources renouvelables.

La poursuite de cet objectif général s'explique en fonction de plusieurs observations du développement actuel du secteur de la production d'énergie. Ces observations se regroupent autour de trois enjeux qui expliquent les fondements de la thèse.

1. Le concept d'évaluation de la durabilité environnementale ;
2. L'importance de l'évaluation des impacts environnementaux de la production d'énergie pour une réflexion sur la durabilité environnementale de ce secteur ;
3. La variabilité spatiotemporelle des sources et impacts environnementaux du secteur de la production d'énergie et des particularités des systèmes de production utilisant des sources d'énergie renouvelables.

Ces enjeux sont décrits dans les sections 1.1, 1.2 et 1.3 et sont analysés brièvement dans la section 1.4 afin d'identifier les aspects qui doivent être considérés par la méthode de modélisation qui sera développée.

Les considérations de la méthode ACV sont ensuite comparées, dans la section 1.5, aux différents aspects précédemment identifiés. Cette comparaison permet de comprendre pourquoi la méthode ACV est choisie pour favoriser le développement durable des systèmes du secteur de l'énergie.

La section 1.6 vient finalement décrire la démarche qui propose de nouveaux développements à la méthode ACV qui sont nécessaires à l'accomplissement de l'objectif général.

1.1 L'évaluation de la durabilité environnementale

Le concept de développement durable doit être clairement défini avant de définir le concept d'évaluation de la durabilité environnementale. La description du concept de développement durable permet, en effet, d'identifier les principes fondamentaux, le cadre d'évaluation et les objectifs d'une évaluation de la durabilité environnementale. Dans un contexte plus général, il s'applique aux trois piliers que sont : l'économie, la société et l'environnement. La durabilité environnementale se restreint cependant à une perspective sur le pilier environnemental.

1.1.1 Définition du concept de développement durable

Le concept de développement durable est apparu au début du XXe siècle. Ces origines sont imprécises puisque l'idée repose sur des notions générales de saine gestion considérant une nécessité de prévision dans un système limité. L'élément fondateur généralement accepté repose sur une définition provenant des travaux de la commission mondiale sur l'environnement et le développement qui a été défini dans le rapport Brundtland (1987). Voici les principes repris dans la définition :

« C'est un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Deux concepts sont inhérents à cette notion :

Le concept de "besoins", et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité.

L'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir »

Analyse du concept de développement durable

La recherche d'un développement qui respecte le concept de développement durable requiert donc une perspective d'analyse qui fait référence aux besoins. L'analyse ou l'évaluation de la durabilité d'un développement doit aussi considérer, au minimum, les effets présents et futurs de ce développement sur les piliers économique, social et environnemental. Ces aspects peuvent être considérés par une évaluation sous perspective du cycle de vie. En effet, l'évaluation sous perspective du cycle de vie considère le système, dans le temps et l'espace, qui est nécessaire à la réalisation d'un besoin.

Le concept de développement durable souligne aussi l'importance de considérer les effets des limites technologiques et sociales sur l'environnement. C'est-à-dire qu'il existe une limite dans la capacité de l'environnement à s'adapter aux flux provenant de l'activité humaine et une limite d'adaptation de l'activité humaine face aux modifications de l'environnement. Ces limites doivent donc être mises en perspective avec la capacité de l'environnement à répondre à nos besoins. Le concept de « biocapacité » est proposé par Catton (1982) pour définir cette limite (Blanc 2010). Il s'agit, dans ce cas, de la charge maximale de substance supportable à long terme par l'environnement. De plus, ces limites se modifient dans le temps et sont variables en fonction de l'endroit où se situe la réponse au besoin. Il existe donc une variabilité spatiale et temporelle (spatiotemporelle) des limites qui complexifie l'évaluation de la durabilité d'un développement. La variabilité des réponses de l'environnement dans différentes régions et moments face aux interactions avec l'activité humaine (système anthropogénique) doit aussi être considérée pour une évaluation plus représentative.

Ces deux principes de la définition du concept de développement durable sont également des principes fondamentaux de l'évaluation de la durabilité environnementale.

1.1.2 Définition du concept d'évaluation de la durabilité environnementale

La durabilité environnementale décrit le niveau de durabilité d'un choix en fonction de son effet sur l'environnement. Plus précisément, le niveau de durabilité environnementale décrit à quel point un système de l'activité humaine a un effet important sur l'état de l'environnement actuel. L'évaluation de la durabilité environnementale est donc l'action d'analyser l'effet d'un système sur l'environnement.

Pour suivre les principes fondamentaux du développement durable, cette évaluation doit se faire en fonction de besoins auxquels le système répond. L'évaluation du système dans le temps (présent et futur) impose aussi une modélisation du système puisqu'il faut faire des hypothèses sur la description du futur des systèmes. La considération des limites/contraintes du système lors de la modélisation est aussi nécessaire pour correspondre aux principes fondamentaux du développement durable. L'identification de ses limites est toutefois aussi complexe que pour le concept de développement durable.

L'imprécision des limites/contraintes est un problème pour l'évaluation des limites physiques, au moins pour le pilier environnemental. En effet, ces limites sont difficiles, voire impossibles, à évaluer précisément parce qu'il faut considérer la capacité d'adaptation présente et future de l'environnement et des systèmes anthropogéniques. Il n'est donc pas possible, actuellement, de dire avec certitude si une solution est durable ou non au niveau environnemental. Une tentative de réponse partielle à ce problème global est toutefois proposée par Meinhausen et al. (2009) pour appréhender la question du changement climatique en fixant une limite de 2°C à la hausse en température terrestre globale.

Une solution envisagée est de contourner ce problème, donc de ne pas identifier les limites, mais plutôt d'évaluer les impacts environnementaux de différents systèmes de l'activité humaine pour déterminer le niveau d'effets néfastes de ces systèmes. Il est alors intéressant de classer ces systèmes en fonction du niveau d'effets néfastes qu'ils occasionnent. Ce type d'évaluation de la durabilité environnementale reste tout de même un outil pour la prise de décisions nécessaires au développement durable bien qu'il ne reflète plus une évaluation de la durabilité de l'environnement face à un système anthropogénique global.

Il reste toutefois une difficulté dans la description des systèmes. En effet, une modélisation permettant de faire une évaluation de la durabilité environnementale ne peut considérer la totalité des processus qui constituent le monde dans lequel nous vivons. Il y a tout simplement trop de variables à considérer. Une description schématique du système global (activité humaine - environnement) permet l'identification des aspects critiques d'une modélisation environnementale par l'évaluation de la durabilité environnementale. Cette description, le DPSIR (EEA 1999; Holten-Andersen et al. 1995; Jesinghaus 1999) synthétise les relations clés entre l'activité humaine et l'environnement.

Modèle DPSIR

DPSIR est un acronyme pour cinq composantes des systèmes de l'activité humaine et de l'environnement. C'est un acronyme anglais qui signifie « Drivers, Pressures, State, Impacts et Responses ». Cet acronyme peut se traduire de la manière suivante : Dynamiques, Pressions, Etats, Impacts et Réponses. La figure 1.1 présente les liens entre les différents secteurs des systèmes de l'activité humaine et de l'environnement.

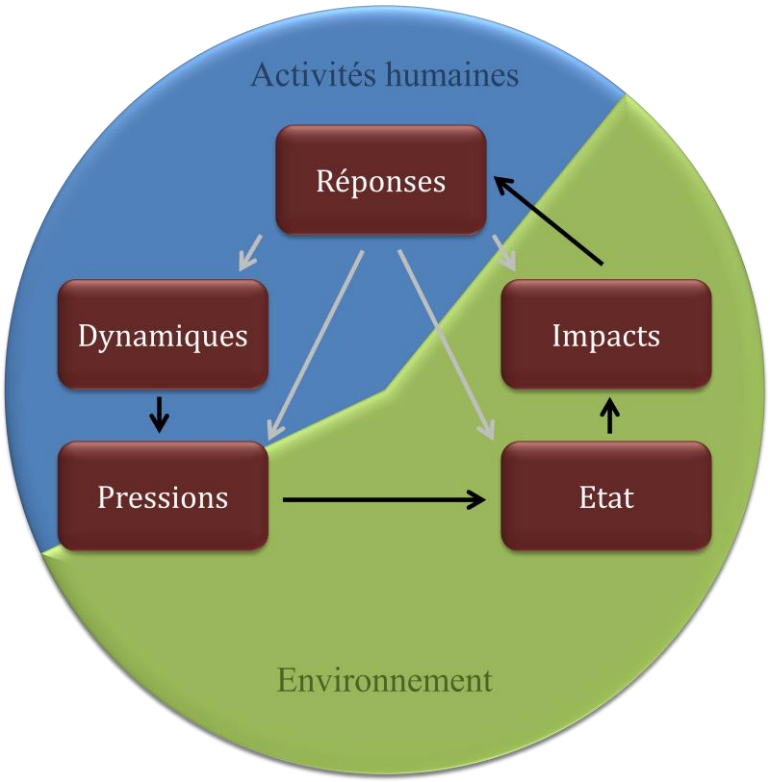


Figure 1.1 : Schéma conceptuel DPSIR qui représente cinq composantes du système combinant l'environnement et l'activité humaine. Le schéma présente aussi les liens entre ces cinq composantes.

Les cinq composantes du schéma de la figure 1.1 sont :

1. Dynamiques : Ce secteur représente les flux de l'activité humaine sous toutes ses formes. Les chaînes de production reliées à des services, produits ou système s'y retrouvent donc. La description de ces flux peut être faite par des mesures physiques ou économiques.
2. Pressions : Il s'agit des pressions de l'activité humaine sur l'environnement. Ce secteur représente les flux de matières premières comme les quantités de ressources naturelles extraites et les émissions de substances polluantes. Il s'agit d'un des secteurs faisant le lien entre l'activité humaine et l'environnement.
3. Etat : Ce secteur représente l'état de l'environnement pour la modélisation. Les concentrations de polluants dans l'air, l'eau et le sol sont de bons exemples d'état, mais il peut aussi s'agir d'information comme la température, la topographie du terrain et les écoulements d'eau. En fait, il s'agit de la caractérisation de l'environnement pour une période et un emplacement donnés.
4. Impacts : Ce secteur décrit les impacts environnementaux. On y évalue les effets que le nouvel état de l'environnement a sur l'humain. Il s'agit donc d'un secteur à la limite entre l'environnement et l'activité humaine. En effet, la traduction de nouvel état de l'environnement en impacts environnementaux se base sur une perspective humaine.
5. Réponses : Ce secteur représente toutes les décisions qui peuvent être prises par l'humain relativement à une perception d'un changement dans l'environnement. Ces décisions peuvent être au niveau législatif, au niveau économique ou même un changement de valeurs dans la société. Toute réponse qui n'est pas reliée à l'analyse d'un impact environnemental ne se classe pas dans l'évaluation de durabilité environnementale.

Les flèches présentées entre les différentes composantes du schéma conceptuel DPSIR de la figure 1.1 expliquent la causalité des liens du système global de l'activité humaine et de l'environnement. Les flèches noires présentent le cycle obligatoire qui peut être attendu par rapport à un changement des dynamiques de l'activité humaine. Lors d'un changement de l'activité humaine, il y a des modifications des pressions sur l'environnement. Ces pressions vont ensuite modifier l'état de l'environnement de différentes manières. Ce ou ces changements de l'état de l'environnement modifient les impacts perçus par l'humain. L'humain peut ensuite proposer différentes réponses en fonction de ce changement. Les flèches grises indiquent, quant à elle, les réponses potentielles sur toutes les composantes du système activité humaine - environnement.

La possibilité de répondre à différents niveaux des systèmes et secteurs explique la pertinence de modéliser les systèmes de l'activité humaine selon différentes perspectives (Friot 2009). Ces perspectives permettent d'obtenir des réponses pertinentes pour chaque type de décision. Une évaluation de la durabilité requiert cependant une considération de toutes les composantes. C'est pourquoi j'ai choisi une modélisation sous perspective du cycle de vie.

La modélisation sous perspective du cycle de vie requiert l'utilisation d'une méthode holistique qui cherche à considérer les impacts environnementaux reliés directement au besoin évalué ainsi qu'à la chaîne de causalité qui y est reliée. En fait, les méthodes de modélisation sous perspective du cycle de vie se concentrent sur la modélisation de l'activité humaine (secteur des dynamiques). Le domaine spatial de cette modélisation est la planète et le domaine temporel considère le passé et le futur avec un horizon illimité théoriquement. L'expression « du berceau à la tombe » est fréquemment utilisée pour décrire les limites temporelles de modélisation.

Pour des systèmes complexes comme les différentes sources de production d'énergie, la chaîne de causalité possède de très nombreuses ramifications sur la planète et pour un domaine temporel de plusieurs décennies. Il existe cependant plusieurs problèmes de représentativité des résultats pour ce type de modélisation. En effet, contrairement à un modèle qui ne considère que le secteur des pressions, la modélisation sous perspective du cycle de vie est surtout performante dans la comparaison de scénarios et non pas dans l'évaluation de valeurs absolues d'impacts. Cette faiblesse s'explique surtout par la nécessité de traduire une multitude de pressions, réparties dans différentes régions et à différents moments, en des impacts environnementaux. Cette traduction directe entre les composantes de *pressions* et *impacts* sans formaliser la composante de l'*état* est très complexe et nécessite plusieurs hypothèses de simplifications qui ne permettent pratiquement pas de considérer les spécificités spatio-temporelles de l'environnement.

Plusieurs développements sont possibles pour ces méthodes, mais il est intéressant de noter que la représentativité dans l'évaluation des impacts pose aujourd'hui problème parce que les caractéristiques de l'environnement (*l'état*) ne sont pas modélisées pour toutes les fluctuations possibles.

Pour résumer, l'évaluation de la durabilité environnementale requiert la considération de plusieurs aspects lors d'une modélisation des impacts environnementaux :

- La nécessité de faire une modélisation sous perspective du cycle de vie ;
- L'intérêt de considérer plusieurs types d'impacts environnementaux;
- La possibilité d'une modélisation détaillée des systèmes complexes de l'activité humaine;
- L'importance de considérer les spécificités spatiotemporelles pour certains systèmes.
- L'utilité de résultats simples permettant la définition de contraintes législatives;

Tous ces critères doivent donc être considérés pour procéder au choix d'une méthode de modélisation qui permette de faire une évaluation de la durabilité.

1.2 Les impacts environnementaux du secteur de l'énergie

La durabilité environnementale du secteur de la production d'énergie est un sujet qui a pris de l'importance depuis quelques années. Le lien direct établi entre l'émission de certains gaz par plusieurs sources d'énergie et l'effet de serre (IPCC 2007) est un des exemples les plus connus qui explique l'importance grandissante de ce sujet au niveau international. Les travaux annuels de recensement des émissions de gaz à effet de serre (GES), effectués par l'AIE[i], soulignent l'importance d'une caractérisation temporelle de ces émissions pour l'évaluation des impacts provenant des différentes formes de production d'énergie. Ces données permettent, en effet, de comparer les tendances dans le temps d'émissions anthropogéniques de GES avec le réchauffement climatique observé. Cette comparaison semble indiquer aujourd'hui l'importance des sources anthropogéniques de GES par rapport à l'augmentation de la température terrestre moyenne.

Plusieurs autres impacts environnementaux observés peuvent s'expliquer en partie par des sources en lien plus ou moins direct avec les systèmes de production d'énergie. Les trois exemples suivants permettent d'alimenter la discussion sur les aspects à considérer pour l'évaluation de la durabilité environnementale :

- La combustion de charbon et lignite de centrales émet des particules microscopiques ayant des effets sur les capacités respiratoires de la population;
- Le même type de combustion a aussi des effets sur l'acidification des cours d'eau;
- La mise en place de certaines structures comme les barrages hydroélectriques peut avoir un effet sur la biodiversité dans une région restreinte;

Les effets de tous ces exemples d'émissions se distinguent de l'effet des émissions de GES par la limitation du périmètre régional. En effet, certaines particules et substances émises dans l'air n'auront pas un effet sur la terre entière puisque leur dispersion n'est pas aussi homogène que celle des GES.

Par ailleurs, les deux premiers exemples de la liste précédente décrivent des sources d'impacts environnementaux qui se lient directement à la combustion de ressources énergétiques. Le troisième exemple décrit plutôt un lien indirect entre l'impact potentiel d'une installation et la production d'électricité. La dépendance entre la création du barrage et sa production d'électricité explique toutefois pourquoi cet effet environnemental est conceptuellement lié. C'est ce type de dépendance qui impose une analyse plus poussée des impacts environnementaux des systèmes nécessaires à la production d'énergie. Il faut, en effet, considérer les impacts environnementaux indirectement liés à la production d'énergie pour pouvoir s'approprier la question d'évaluation de la durabilité environnementale des systèmes de production d'énergie.

La considération des impacts environnementaux de la phase d'extraction de la bauxite en Afrique qui est nécessaire à la production canadienne d'aluminium utilisé pour la fabrication d'installations photovoltaïques en Allemagne est un exemple du degré de complexité à envisager. Des liens encore plus complexes doivent être considérés pour la modélisation des systèmes de production d'énergie puisque ce secteur possède une multitude de ramifications au sein de l'activité humaine.

[i] Agence internationale de l'énergie : http://www.iea.org/

1.3 Spécificités spatiotemporelles de la production d'énergie

Le secteur de l'énergie se définit par plusieurs aspects qui sont variables au niveau spatiotemporel (voir annexe 1). La production d'énergie par des sources renouvelables présente plusieurs autres aspects qu'il est intéressant de considérer lors d'une évaluation sous perspective du cycle de vie.

Tout d'abord, plusieurs nouvelles technologies basées sur des sources d'énergie renouvelable sont maintenant en phase d'intégration dans le mix énergétique de plusieurs pays afin de réduire les impacts environnementaux de la production d'énergie et la dépendance aux ressources fossiles.

Les énergies renouvelables qui se développent rapidement aujourd'hui présentent cependant une infrastructure complètement différente des technologies traditionnelles. Les particularités de ces nouvelles infrastructures doivent être bien identifiées pour évaluer leurs impacts environnementaux et donc leur durabilité environnementale.

Sources d'énergie renouvelable :

- L'énergie solaire (radiation)
- L'énergie de la biomasse (conversion de l'énergie solaire)
- L'énergie éolienne (mouvement de l'air causé par l'énergie solaire)
- L'énergie des vagues (mouvement sur la surface de l'eau causé par le mouvement de l'air)
- L'énergie hydraulique (mouvement de l'eau causé par l'énergie solaire et la gravité de la terre)
- L'énergie géothermique (énergie thermique interne de la planète terre)
- L'énergie des marées (effet gravitationnel de la lune)

Ces sources ont toujours fait partie de notre environnement et ne sont donc pas considérées comme des sources d'impacts environnementaux.

Disponibilité de la ressource

Les ressources renouvelables d'énergie sont différentes des ressources non renouvelables à plusieurs égards. Contrairement aux réserves non renouvelables qui sont en des endroits spécifiques du globe sous différentes formes permettant le stockage, les énergies renouvelables se retrouvent dans une multitude d'endroits, mais sous forme de chaleur, de mouvement ou radiation qui compliquent leur stockage. Les difficultés de stockage sont variables, les barrages hydroélectriques sont un exemple intéressant d'une méthode de stockage de ressources renouvelables, mais la majorité des modes d'extractions ne possèdent pas encore ce potentiel de stockage.

Bien que les ressources renouvelables soient réparties plus uniformément que les ressources non renouvelables, il faut préciser qu'il existe bien une variabilité spatiale et temporelle dans la disponibilité des ressources. Aujourd'hui, la variabilité spatiale est surtout limitée en fonction de la rentabilité de l'extraction de l'énergie. Malgré l'existence de vent sur la totalité de la surface du globe, l'exploitation de l'énergie éolienne est surtout envisagée pour des sites où le vent est stable en vitesse et relativement constant dans le temps. Un autre exemple de la variabilité spatiale d'une ressource renouvelable provient de la carte d'irradiation annuelle mondiale de la figure 1.2. La variabilité spatiale de cette carte démontre clairement que certaines régions sont, en moyenne, exposées à une plus grande quantité de radiation solaire durant une année.

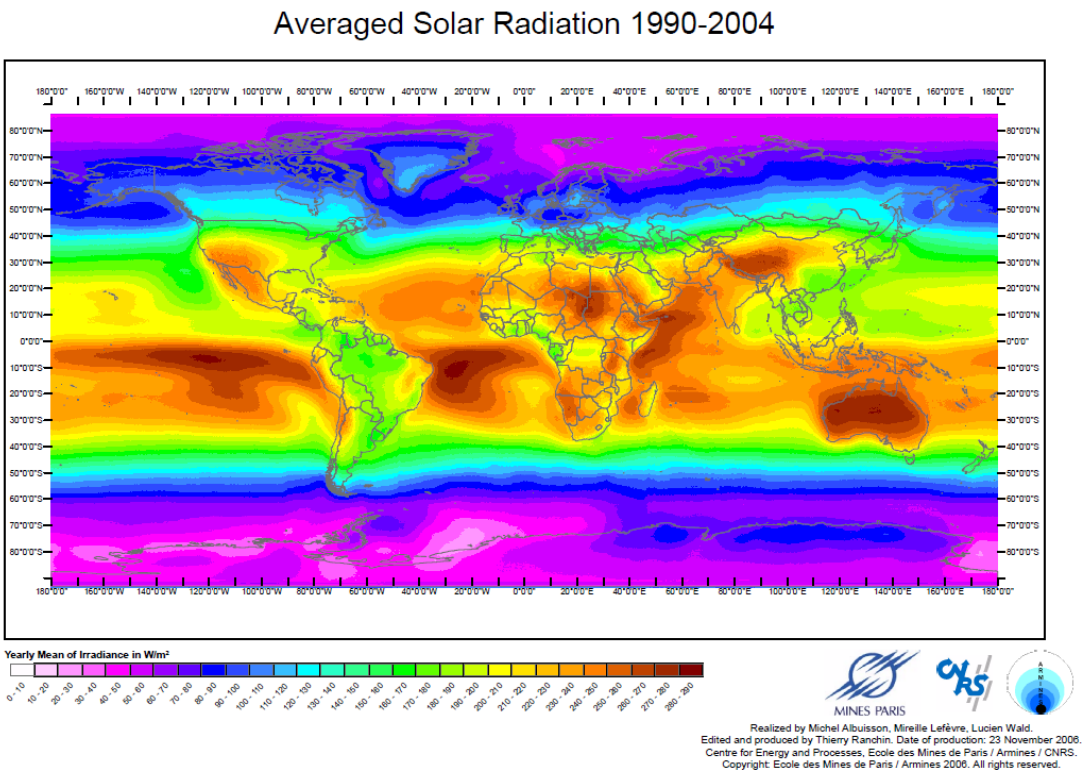


Figure 1.2 : Carte mondiale de la moyenne annuelle d'irradiation solaire basée sur les statistiques allant de 1990 à 2004. Ces statistiques proviennent d'une modélisation des irradiations estimées à partir de données satellites. Source - http://www.soda-is.com/eng/map/maps_for_free.html

Il existe aussi une variabilité temporelle dans la disponibilité de la ressource. La ressource solaire est un exemple marquant de l'importance de la variabilité temporelle de la disponibilité de la ressource. En effet, la lumière du soleil est disponible, totalement ou en partie, en fonction des heures de la journée. Il faut aussi noter que la prédiction de la disponibilité de la ressource requiert des modèles complexes reliés à la climatologie. Seules les énergies des marées et de la géothermie peuvent être prédites avec une plus grande fiabilité sur de courte et longue périodes.

Il faut donc retenir que la disponibilité des ressources renouvelables varie au niveau spatio-temporel à différentes échelles. Le niveau de variabilité et de capacité de prédiction dépend d'ailleurs de l'échelle spatiale ou temporelle considérée comme pertinente.

Innovation et performance de production

Le secteur de la production d'énergie à partir de sources renouvelables se développe différemment en fonction de la source. L'énergie hydraulique est exploitée depuis plusieurs décennies, mais les éoliennes et les systèmes PV et solaire thermiques commencent seulement à concurrencer les sources traditionnelles pour une part de marché non négligeable. Les connaissances sur les modes et efficacités d'exploitation sont donc assez variables. Cette variabilité est surtout observable au niveau temporel. La figure 1.3 présente l'exemple de la variation de l'efficacité de conversion d'énergie de différentes technologies de cellules solaires depuis 1976. Il faut cependant noter que les technologies les plus récentes sont aussi reliées à des connaissances qui ne sont pas internationales. L'expertise dans le domaine de l'énergie éolienne est, par exemple, actuellement détenue en grande proportion au Danemark. Il existe donc aussi une variabilité spatiale dans le degré d'innovation envisageable, à court terme, pour les différentes sources d'énergie renouvelable. Ce portrait se modifie toutefois rapidement comme le démontre l'importance grandissante que la Chine prend dans le secteur du PV.

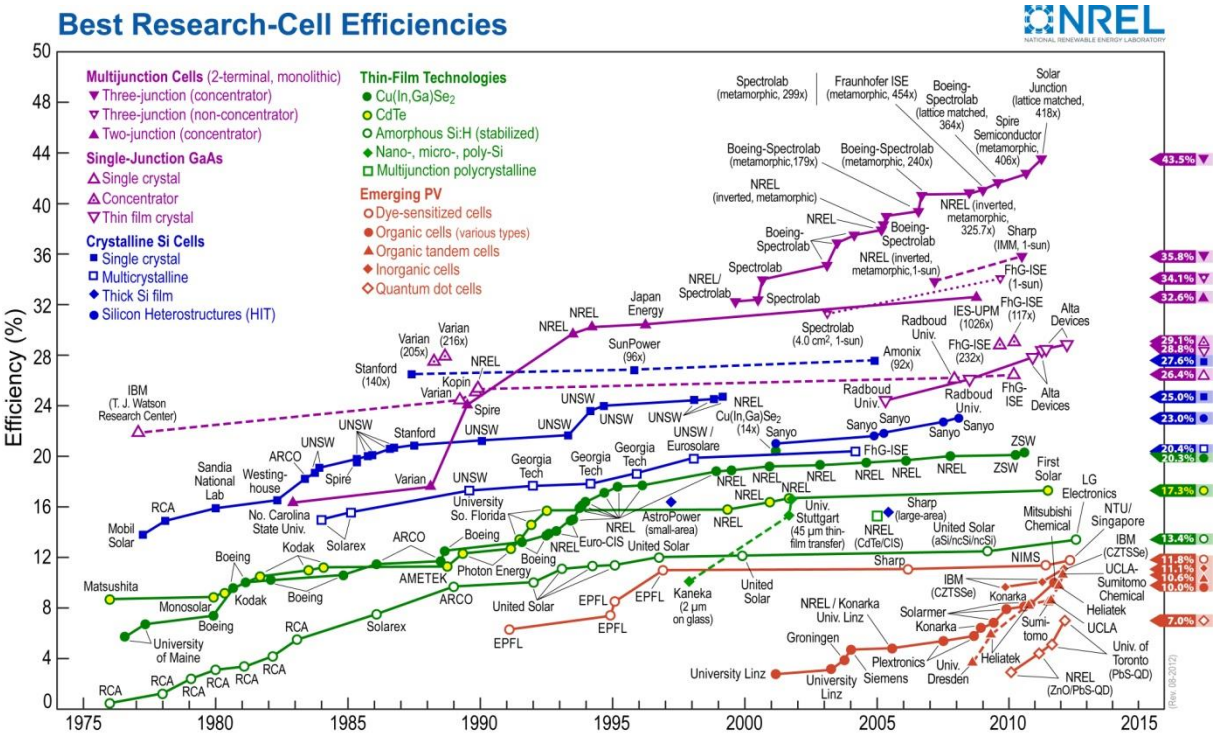


Figure 1.3 : Calendrier de l'efficacité de conversion d'énergie de différentes cellules photovoltaïques. NREL

Importance de l'infrastructure sur les impacts environnementaux

Les nouvelles installations permettant la production d'énergie à partir de sources renouvelables modifient aussi la provenance des effets sur l'environnement. Tout d'abord, la phase du système de production d'énergie responsable d'une majorité des impacts n'est plus la production d'énergie, mais bien la fabrication des infrastructures. Il s'agit donc potentiellement d'une autre réalité pour les lieux et moments d'impacts environnementaux. De plus, ces nouvelles sources d'énergie nécessitent normalement moins de ressources fossiles et il faut donc envisager que leurs effets ne sont plus sur le réchauffement climatique, mais bien sur d'autres catégories d'impacts qui sont moins connues et envisagées aujourd'hui. Il convient donc de considérer les différents types d'impacts environnementaux reliés à ces nouvelles sources (éolienne, solaire, biomasse, marine et géothermique) afin d'en évaluer la durabilité.

Utilité d'une modélisation détaillée des systèmes

Que ce soit, pour la question d'une évaluation de l'épuisement des ressources énergétiques ou l'évaluation des quantités de GES émis, la description du secteur de la production d'énergie présentée dans cette section indique bien la quantité et la diversité importante d'aspects à considérer. La disponibilité dans le temps des ressources renouvelables, les sites de consommation d'énergie ou l'évolution technologique des moyens de transformation de l'énergie sont des exemples clairs de l'importance de considérer les caractéristiques spatiotemporelles pour l'évaluation de la durabilité environnementale. Une description détaillée des systèmes semble donc être un pré requis à une évaluation représentative et utile du secteur de la production d'énergie par des sources renouvelables.

Il faut comprendre qu'un haut niveau de détail dans la modélisation des systèmes est utile pour prendre des décisions fines au niveau stratégique et ainsi favoriser la durabilité environnementale du secteur sans devoir nécessairement proposer des contraintes législatives importantes. Les méthodes de modélisation environnementale n'appréhendant pas sous perspective du cycle de vie ne sont pas très performantes à ce niveau puisqu'il n'est pas simple de déterminer comment un changement de certaines parties d'un système pourrait se traduire en impacts environnementaux.

1.4 Méthode pour l'évaluation de la durabilité environnementale

Les sections 1.1, 1.2 et 1.3 répertorient plusieurs statistiques, concepts, principes et aspects qui doivent être considérés pour l'évaluation de la durabilité environnementale de différents systèmes de production d'énergie. Un récapitulatif de ces points clés est présenté ici pour expliquer le choix d'une méthode de modélisation spécifique pour faire ce type d'évaluation pour le cas spécifique des systèmes de production d'énergie et plus spécifiquement à partir de sources renouvelables.

La section 1.1 présente le concept de l'évaluation de la durabilité environnementale. Cette description permet de mieux comprendre pourquoi il s'agit d'un sujet complexe. Le concept de développement durable est la source des principes fondamentaux et de la définition de ce type d'évaluation. Ce principe fondamental souligne la nécessité d'une évaluation sous perspective du cycle de vie. Cette évaluation impose la prise en compte du présent et du futur des systèmes répondant aux besoins. Elle indique que l'évaluation passe par une modélisation des systèmes. La nécessité de considérer des contraintes technologiques, sociales et environnementales relève du second principe fondamental du développement durable. Ces contraintes sont difficiles à évaluer, il devient alors plus simple de faire l'évaluation des impacts environnementaux lors de l'évaluation de la durabilité environnementale d'un système. Les résultats de l'évaluation doivent donc être accessibles pour des décideurs non spécialistes de la modélisation de l'évaluation de la durabilité environnementale.

La section 1.2 décrit ensuite quelques exemples d'impacts environnementaux liés aux multiples ramifications de différents systèmes de production d'énergie. Ces exemples permettent de mieux comprendre la complexité de la modélisation des systèmes et de ses interactions avec l'environnement lors de l'évaluation de la durabilité environnementale. Ces exemples confirment aussi l'intérêt d'évaluer les systèmes de production d'énergie avec une modélisation sous perspective du cycle de vie.

La section 1.3 détaille finalement le secteur de la production d'énergie à l'aide de statistiques et valeurs qui démontrent la variabilité spatiotemporelle importante de plusieurs aspects à considérer dans la modélisation de ces systèmes. Plus spécifiquement, l'intérêt d'une modélisation sous perspective du cycle de vie est expliqué pour les systèmes de production d'énergie à partir de sources renouvelables. La complexité des ramifications de ces systèmes à travers l'activité humaine dans le temps et l'espace en font des candidats intéressants pour une évaluation de la durabilité environnementale.

1.5 Objectif de la thèse

Il existe aujourd'hui plusieurs méthodes de modélisation sous perspective du cycle de vie. L'annexe 2 présente un tableau des méthodes les plus connues. Toutes ces méthodes ont été développées avec l'objectif commun d'évaluer les effets de l'activité humaine sur certains aspects de l'environnement. Plusieurs documents décrivent ces différentes méthodes en détail (IMEA *(Blanc et al*. 2009), EIPOT (Wiedmann *et al*. 2009), Handbook of I/O economics in industrial ecology (Suh 2009)). Ces documents permettent d'identifier que la méthode ACV correspond mieux aux aspects identifiés dans la section 1.1. Le tableau 1-1 souligne le niveau de correspondance entre les aspects identifiés précédemment et les caractéristiques de la méthode ACV. Dans cette thèse, cette méthode est choisie pour l'évaluation de la durabilité environnementale des systèmes de la production d'énergie dans le cadre général présenté.

Tableau 1-1 : Liste des correspondances et oppositions entre les considérations nécessaires à l'évaluation de la durabilité environnementale des systèmes de production d'énergie et les capacités de la méthode ACV.

Considérations pour l'évaluation de la durabilité environnementale	Capacité de la méthode ACV
Modélisation sous perspective du cycle de vie	Oui
Capacité de considérer plusieurs types d'impacts environnementaux	Oui
Capacité de modélisation détaillée d'un système complexe	Oui, difficile
Considération des spécificités spatiotemporelles	Partiellement possible
Résultats synthétiques pour les décideurs	Oui

Le tableau 1-1 souligne les faiblesses de la méthode ACV et certains aspects qui nécessitent un développement. Une des lacunes importantes de la méthode ACV est la faible considération des spécificités spatiotemporelles. Cette conclusion explique finalement le choix de l'objectif général de la thèse qui consiste à :

Proposer des développements pour la méthode ACV afin de simplifier et expliciter la considération des spécificités spatiotemporelles lors de sa mise en œuvre.

La pertinence de cet objectif général est basée sur l'hypothèse que l'intégration de considérations spatiotemporelles dans des études ACV permet une plus grande représentativité lors de l'évaluation de systèmes de production d'énergie. Ce gain en représentativité est une valeur ajoutée significative qui devrait engendrer des modifications dans la prise de décision pour améliorer l'évaluation de la durabilité environnementale des systèmes de production d'énergie.

1.6 Démarche de la thèse

La première étape pour atteindre l'objectif général de la thèse est de décrire en détail la méthode de modélisation ACV (cadre général de la thèse). L'analyse de la méthode ACV permet d'identifier ces limites, les concepts importants à conserver et les concepts à développer pour une considération plus efficace des spécificités spatiotemporelles.

La description de la méthode ACV est présentée dans le chapitre 2. Les concepts exposés, bien que fréquemment expliqués à partir d'exemple de systèmes de production d'énergie, doivent s'appliquer à une majorité des systèmes de l'activité humaine.

Le chapitre 3 analyse les développements existants pour la considération des spécificités spatiotemporelles lors de la mise en œuvre de la méthode ACV. Cette analyse sert ensuite à la définition de développements méthodologiques spécifiques.

Le chapitre 4 répond au premier objectif spécifique de la thèse qui porte sur le développement de la question de la caractérisation spatiotemporelle lors de la modélisation. La solution retenue va nécessiter une modification de la méthode de calcul des inventaires du cycle de vie.

Le chapitre 5 décrit la démarche qui permet de développer une nouvelle méthode de calcul d'inventaire du cycle de vie identifiée comme nécessaire au chapitre 4.

Il est ensuite pertinent de tester ces développements méthodologiques sur des cas d'études précis pour évaluer le niveau d'atteinte des objectifs spécifiques. Ces cas d'études et leurs résultats sont présentés au chapitre 6.

La conclusion (chapitre 7) présente finalement un résumé des résultats des chapitres 4, 5 et 6 afin de discuter du niveau d'atteinte des objectifs spécifiques de la thèse. Cette discussion permet aussi de faire une analyse du niveau d'atteinte de l'objectif général et des modifications à envisager pour les développements futurs de la méthode ACV.

2 METHODE ANALYSE CYCLE DE VIE

L'introduction argumente sur la nécessité de développer la méthode de l'*analyse cycle de vie* (ACV) afin qu'elle soit plus performante dans la considération des spécificités spatiotemporelles. Cet intérêt est encore plus marqué pour les nouvelles énergies renouvelables qui sont des systèmes passifs[i] au niveau environnemental. En effet, la phase de fabrication des infrastructures, qui est normalement négligée dans les modèles sans perspective du cycle de vie, prend une tout autre importance dans ce type de production d'énergie.

Toutefois, tel que mentionné dans l'introduction, les études ACV actuelles ne considèrent que rarement les spécificités spatiotemporelles. Cette situation est reconnue par plusieurs auteurs (Finnveden *et al*. 2009; Guinee *et al*. 2011; Reap *et al*. 2008) et touche la modélisation des systèmes aussi bien que la modélisation des impacts environnementaux. Plusieurs raisons sont proposées pour expliquer ce manque de considération des aspects spatiotemporels dans la méthode ACV, et pour mieux les comprendre, il faut analyser plusieurs aspects de cette méthode.

L'objectif du chapitre est donc de décrire la méthode ACV avec un niveau de détail suffisant pour identifier les difficultés/obstacles qui diminuent la possibilité de considérer les spécificités spatio-temporelles. Cette description construit les fondations pour proposer de nouveaux développements à la méthode ACV dans les chapitres suivants. Il s'agit en fait d'un état de l'art commenté. Accessoirement, certains concepts sont présentés dans ce chapitre pour servir de référence dans les chapitres présentant les développements méthodologiques.

La section 2.1 propose une description générale de la méthode ACV. Cette description se fait en définissant les principes généraux, la structure et ses phases. Elle définit donc un vaste cadre pour les développements proposés dans la thèse.

La section 2.2 présente l'historique de développement des considérations spatiotemporelles pour la méthode ACV. Cet historique confirme l'importance de la considération des spécificités spatiotemporelles, présente certaines inquiétudes sur la viabilité d'une complexification des études et la discussion débute sur certaines considérations pour la modélisation dans le cadre de la méthode ACV.

La section 2.3 décrit les considérations spatiotemporelles dans la première phase de la méthode où les objectifs et le cadre d'une étude ACV sont définis. L'information spatiotemporelle considérée dans cette phase doit permettre d'évaluer la représentativité de la modélisation ACV. La section 2.4 décrit la deuxième phase de la méthode où les systèmes sont modélisés. Cette section explique aussi comment calculer les inventaires du cycle de vie (ICV). La conservation de la caractérisation spatiotemporelle est primordiale lors de la modélisation des systèmes et du calcul des ICVs. La section 2.5 décrit la troisième phase de la méthode ACV où les impacts environnementaux sont modélisés. Les spécificités spatiotemporelles permettent la définition des facteurs de caractérisation représentatifs (FC) qui constituent les méthodes de modélisation des impacts environnementaux.

La section 2.6 fait un récapitulatif des forces et faiblesses méthodologiques identifiées au niveau de la considération des spécificités spatiotemporelles pour chacune des phases de la méthode ACV. Ce récapitulatif sera ensuite utilisé au chapitre 3 pour définir les objectifs spécifiques de la thèse.

[i] Un système passif, à l'inverse d'un système actif, est lié à une phase d'utilisation qui a peu d'importance.

2.1 Description générale de la méthode ACV

Cette section décrit les aspects fondamentaux qui cadrent les développements proposés dans le reste du document. Plusieurs ouvrages, dont deux normes internationales, décrivent la méthode ACV avec plus de détail (annexe 3). Ces ouvrages sont d'ailleurs cités à plusieurs reprises dans ce chapitre. Plusieurs termes de ces références sont redéfinis dans le glossaire (page XXVII).

2.1.1 Définition et principes généraux

Selon Jolliet et al. (Jolliet *et al*. 2010), la méthode ACV se définit comme étant :

« Une méthode de modélisation qui évalue l'impact environnemental d'un produit, d'un service ou d'un système en relation à une fonction particulière et ceci en considérant toutes les étapes de son cycle de vie. »

La norme ISO 14 040 (ISO 2006b) définit sept principes généraux qui aident à mieux comprendre les objectifs d'évaluation environnementale qui mènent à l'utilisation de la méthode ACV. Voici une liste de ces sept principes ainsi qu'une brève description[i] de ceux-ci:

- *Perspective du cycle de vie* : Il faut considérer l'ensemble du cycle de vie d'un produit, de l'extraction des matières premières au traitement en fin de vie. L'expression « du berceau à la tombe » est fréquemment utilisée pour illustrer cette perspective.
- *Intérêt environnemental* : seuls les aspects environnementaux doivent être considérés dans ce type de modélisation. Les impacts sociaux et économiques sont généralement à l'extérieur du cadre des études ACV. Il ne faut cependant pas oublier que les aspects environnementaux sont, dans ce type de modélisation, reliés à l'activité humaine.
- *Approche relative et unité fonctionnelle* : La modélisation est relative à l'*unité fonctionnelle* (UF) qui définit la fonction des scénarios évalués. Tous les résultats d'une modélisation ACV (inventaire cycle de vie, impacts environnementaux) dépendent de cette UF et les analyses doivent donc s'y référer. Il faut considérer la plus grande proportion possible du système nécessaire à la réalisation de cette fonction définie par l'UF.
- *Approche itérative* : Chaque phase d'une ACV est réévaluée en fonction des résultats des autres phases. L'itération de la modélisation doit contribuer à la complétude et à la cohérence de l'étude. Une approche itérative permet aussi de commencer par une modélisation grossière qui sert à l'identification des aspects importants nécessitant une modélisation plus fine permettent d'atteindre les objectifs d'une étude.
- *Transparence* : Présentation ouverte, complète et compréhensible des informations. Ce principe est important puisque les études ACV sont complexes et requiert de nombreuses hypothèses. Il est alors difficile d'en analyser la pertinence si certaines informations sont dissimulées.
- *Complétude* : Une étude ACV doit présenter les effets sur l'environnement, la santé humaine et les ressources naturelles afin d'identifier des compromis possibles et d'évaluer le système avec une perspective transversale. En d'autres mots, les résultats d'une étude ACV doivent renseigner tous les impacts environnementaux pertinents pour répondre à l'objectif d'amélioration du système.
- *Priorité de l'approche scientifique* : Les décisions prises dans le cadre d'une ACV se basent de préférence sur les sciences de la nature limitant le nombre de décisions reliées à des choix de valeurs. Les sciences économiques, sociales et les conventions internationales peuvent aussi être utilisées si les sciences de la nature n'offrent pas de guide.

[i] Les descriptions de ces principes généraux sont fortement inspirées des descriptions offertes dans la norme ISO 14 040. Certains détails sont proposés afin d'offrir un éclairage supplémentaire sur ces principes.

2.1.2 Structure de l'ACV

La structure de la méthode ACV décrite dans la figure 2.1 est une version modifiée de la structure définie dans la norme ISO 14 040 (ISO 2006b). Cette figure permet de mieux comprendre l'ordre à suivre pour faire une étude ACV. Les itérations entre les différentes phases sont soulignées par les flèches à double sens. Les itérations se font donc toujours en lien avec une analyse des résultats des trois premières phases.

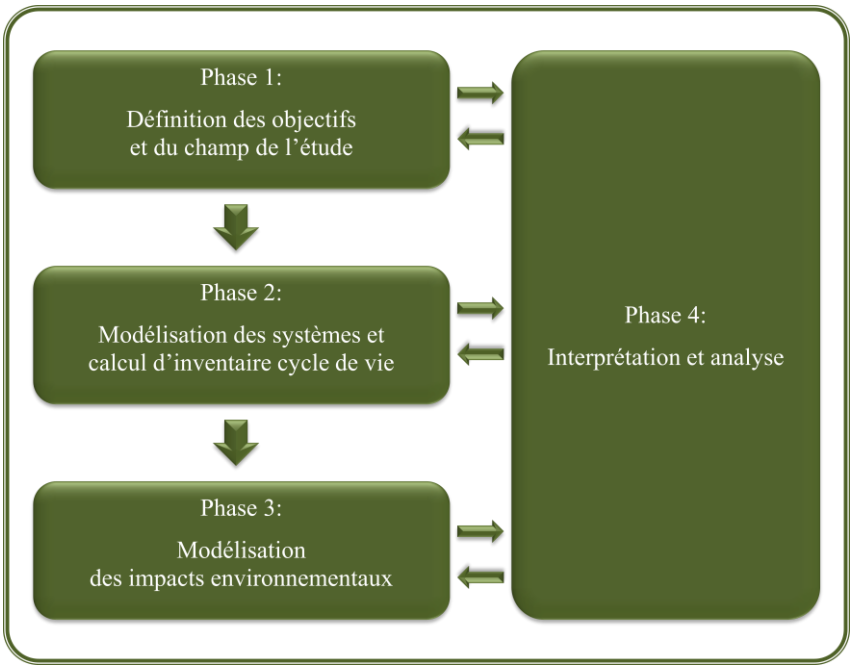


Figure 2.1 : Schéma de la structure de la méthode ACV décrivant les liens entre ses quatre phases. Cette structure souligne le caractère itératif de la méthode à l'aide du sens des flèches utilisées.

Phase 1 : Définition des objectifs et du champ de l'étude (voir aussi section 2.3)

Jolliet et al. (2010) (p.7-8) proposent une brève définition de chacune de ces quatre phases qui résume bien les aspects importants de celles-ci. Ces résumés[i] sont repris ci-dessous afin d'apporter des précisions sur l'information de la figure 2.1.

« Cette phase permet de poser le problème, de définir les objectifs et le champ de l'étude. Cette phase détermine une série d'éléments cruciaux : la fonction du système, l'unité fonctionnelle à laquelle les émissions et les extractions seront ensuite rapportées. Elle définit également les limites du système considéré. Les scénarios de base et les alternatives à étudier sont définis en détail lors de cette phase. »

Cette première phase de la méthode ACV définit les fondations du travail qui doit être accompli pour une étude ACV spécifique. Elle se divise en deux étapes qui sont : la définition des objectifs et la définition du champ (cadre) de l'étude. La première phase est donc comparable aux étapes de définition d'objectifs, de l'état de l'art et du cadre méthodologique qui se retrouvent normalement dans une démarche scientifique. Chaque étude ACV possède des objectifs et un champ spécifique. Il faut cependant retrouver certains types d'information dans toutes les études. Ce sont ces informations qui permettent d'évaluer la représentativité des résultats d'une étude ACV.

[i] Des commentaires supplémentaires ont été ajoutés pour que la description soit plus en lien avec les ajustements opéré par rapport à la structure de l'ACV proposé dans la norme ISO 14 040. Il faut aussi noter que des termes plus spécifiques au domaine de l'ACV ont été utilisés pour ces descriptions (voir glossaire).

Définition des objectifs

L'objectif général[i] d'une étude ACV doit, à minima, définir :

- L'application envisagée du système ;
- Les raisons conduisant à réaliser l'étude ;
- Le public concerné ;
- Si les résultats sont utilisés à des fins de comparaison.

Les autres objectifs permettent de mieux comprendre les points d'intérêts de l'évaluation environnementale. Les considérations de la modélisation ACV doivent correspondre aux objectifs de l'étude pour favoriser la pertinence des résultats.

Définition du champ de l'étude

Cette étape sert à la description des systèmes répondant aux fonctions identifiées dans l'objectif de l'étude et des hypothèses de modélisation qui y sont liés. Toutes ces descriptions permettent de faire une évaluation qualitative du niveau de représentativité de la modélisation ACV par rapport aux objectifs de l'étude. En d'autres mots, il s'agit de l'information qui permet l'évaluation de la qualité et de la pertinence des résultats de l'étude.

La norme ISO 14 044 définit une liste d'éléments[ii] à décrire pour cette étape de la première phase de la méthode ACV. Cette liste est mise à disponibilité dans l'annexe 4 avec quelques ajouts provenant de l'ouvrage de Jolliet et al (2010) et du manuel ILCD (2010). Tous ces documents décrivent en détail chacun de ces éléments.

Phase 2 : Modélisation des systèmes et calcul d'inventaire cycle de vie (voir aussi section 2.4)

Jolliet et al. (2010) indiquent que :

« Cette phase quantifie les émissions polluantes dans l'air, l'eau et le sol ainsi que les extractions des matières premières renouvelables ou non renouvelables. Elle détermine également l'utilisation des sols nécessaire pour la réalisation de la fonction du système. »

La quantification des émissions et extractions (flux élémentaires) se fait, dans un premier temps, pour tous les processus liés aux systèmes répondant à la fonction. Il faut ensuite lier ces différents processus entre eux à l'aide de flux de processus pour modéliser les systèmes par rapport à l'UF. La quantification des différents flux par rapport à l'UF de l'étude se fait en définissant les flux de référence. Ce sont ces flux de référence qui permettent le calcul des flux élémentaires liés au cycle de vie d'un produit répondant à une fonction. Le résultat de la compilation des flux élémentaires sur le cycle de vie d'un système permet d'obtenir l'inventaire cycle de vie (ICV).

[i] Il faut noter qu'il est attendu que l'objectif général d'une étude ACV soit constant pour toutes les itérations nécessaires à l'atteinte de cet objectif. Il est cependant possible de modifier les sous-objectifs et les considérations spatiotemporelles qui leur sont liées.

[ii] A titre indicatif, l'UF est définie dans cette étape de la première phase.

Etape de modélisation des systèmes et bases de données

Cette étape de la méthode ACV est considérée comme étant celle qui est la plus exigeante au niveau du temps de travail[i]. Trois facteurs expliquent pourquoi la récolte de données est particulièrement longue :

1. Il existe une multitude de processus à considérer pour modéliser un système. En effet, tous les processus qui sont responsables d'une proportion non négligeable des impacts environnementaux doivent théoriquement être considérés. Plus spécifiquement, ce sont les flux élémentaires liés à ces processus qui sont responsables d'effets sur l'environnement.
2. Il est judicieux de modéliser un système avec des processus les plus élémentaires possible. Une modélisation d'un système avec un haut niveau de granularité permet, en effet, une analyse plus détaillée des systèmes et une plus grande transparence. Ce qui impose toutefois un plus grand nombre de processus.
3. Le caractère privilégié (besoin de confidentialité) de certaines informations nécessaires à la description des processus complique leurs obtentions.

Tous ces facteurs expliquent pourquoi il devient rapidement intéressant de recourir à des bases de données (BDDs) qui renseignent sur une grande quantité de processus de l'activité humaine. *Dans ces BDDs, tous les flux sont définis de manière relative aux processus ce qui permet de les réutiliser pour modéliser différents systèmes.* Ce principe de modélisation est critique à l'utilité des BDDs.

Les BDDs actuelles donnent plusieurs renseignements qui permettent d'évaluer le niveau de représentativité des processus utilisés par rapport aux attentes définies dans le champ de l'étude de la première phase. Ces informations sont qualitatives et quantitatives (méta-information). Elles sont nécessaires pour assurer l'utilité des BDDs pour l'accomplissement de différentes études. Il existe plusieurs BDDs qui sont spécifiquement construites pour la modélisation ACV. L'annexe 5 fait la liste de quelques-unes de ces BDDs et décrit des spécificités de chacune d'entre elles brièvement.

Etape du calcul d'inventaire cycle de vie

La discussion précédente indique que les systèmes sont modélisés à partir de la description des liens (flux de référence) entre les différents processus qui agrègent plus ou moins les systèmes évalués. Les résultats utiles pour la modélisation des impacts environnementaux sont toutefois liés à une liste de flux élémentaires (liens entre les processus et l'environnement) par rapport au cycle de vie d'un système répondant à une fonction (l'UF définit le système qui répond à une fonction). Cette liste est spécifiquement dénommée : inventaire cycle de vie (ICV) dans le jargon de la méthode ACV.

Le calcul d'ICV établi donc la correspondance entre les flux de références relatifs à une UF en une liste équivalente de flux élémentaires spécifiques au cycle de vie d'un système répondant à une fonction. Ce type de calcul requiert une gestion spécifique de l'information de modélisation des systèmes. Il doit aussi permettre la propagation d'autres informations utiles à la modélisation des impacts environnementaux comme la description du milieu de transfert (compartiment) des flux élémentaires (ex. : eau, sol et air).

[i] Ce commentaire est fait dans plusieurs documents de référence comme la norme ISO 14 040, l'ouvrage de Jolliet et al (2010) ou le document des principes de Shonan (Sonnemann et al, 2011).

Phase 3 : Modélisation des impacts environnementaux (voir aussi section 2.5)

Jolliet et al. (2010) définit que :

« L'analyse de l'impact environnemental évalue l'impact sur l'environnement des émissions et extractions inventoriées dans la phase précédente. Cette évaluation peut se décomposer en trois étapes :

*La **classification** détermine quelles émissions contribuent à quels impacts environnementaux (effet de serre, toxicité humaine, écotoxicité, diminution des ressources, etc.) ;*

*La **caractérisation intermédiaire** pondère les émissions à l'intérieur de chacune des catégories d'impact ;*

*La **caractérisation des dommages** regroupe les catégories d'impact dans des catégories de dommages (dommages sur la santé humaine, les écosystèmes, les équilibres climatiques…)*

Une étape supplémentaire de normalisation peut être effectuée pour mettre en évidence la contribution du produit étudié à l'effet mondial global dans une catégorie d'impact environnemental donnée. L'analyse de l'impact environnemental peut finalement être complétée par la pondération sociale des impacts ou des dommages qui évalue l'importance relative des classes intermédiaires d'effet ou des différents dommages. »

L'analyse des impacts environnementaux est l'étape de l'ACV où il faut modéliser les effets environnementaux des flux élémentaires d'un scénario. L'objectif est de traduire ces effets pour différentes catégories d'impacts. L'étape de modélisation des impacts environnementaux cherche à combiner les étapes d'état et d'impacts du modèle DPSIR (voir sous-section 1.1.2) pour obtenir des résultats plus faciles à analyser.

Une modélisation holistique de l'environnement n'est cependant pas simple et les modèles existants aujourd'hui doivent faire plusieurs approximations et hypothèses afin d'obtenir des résultats qui peuvent aider les décideurs. Pour y arriver, une majorité des méthodes de modélisation des impacts environnementaux contemporaines utilisent des facteurs de caractérisation (FCs[i]) standards représentatifs d'une certaine réalité de l'état de l'environnement. En d'autres mots, ces méthodes considèrent une variabilité faible de l'état au niveau spatiotemporel. Cette simplification a été identifiée comme un des problèmes majeurs pour la représentativité de la méthode ACV (Reap *et al*. 2008). L'incertitude provenant de cette simplification pose parfois problème lorsqu'un analyste cherche à identifier des différences significatives entre différents scénarios.

La remarque *i)* de la page 9 de la norme ISO 14 040 confirme qu'il existe une incertitude provenant de l'intégration spatiotemporelle utilisée pour simplifier la modélisation des impacts environnementaux :

i) « L'ACV traite des impacts environnementaux potentiels. L'ACV ne prédit pas des impacts environnementaux absolus ni précis en raison :

- *De l'expression relative des impacts par rapport à une unité de référence,*
- *De l'intégration des données environnementales dans l'espace et le temps,*
- *De l'incertitude inhérente à la modélisation des impacts, et*
- *Du fait que certains impacts possibles sont clairement des impacts futurs ; »*

[i] Voir abréviations p. XXI

La norme ISO 14 044 indique pourtant à la page 21 que :

« En fonction du mécanisme environnemental et des objectifs et du champ de l'étude, il convient de considérer la variabilité spatiale et temporelle du modèle de caractérisation qui rattache les résultats de l'inventaire à l'indicateur de catégorie. Il convient que le devenir ultime et le transport des substances soient intégrés au modèle de caractérisation. »

Cette remarque démontre que le cadre méthodologique requiert une considération des spécificités spatiotemporelles si elles ont un effet sur la modélisation des impacts environnementaux.

Phase 4 : Interprétation et analyse[i]

Jolliet *et al*. (2010) indique que :

« Cette phase permet aussi bien d'interpréter les résultats obtenus dans chacune des phases précédentes que d'évaluer les incertitudes. Les points clés et les options d'amélioration du produit étudié sont identifiés. Des études de propagation des incertitudes et des études de sensibilité sont effectuées pour dégager les paramètres les plus influents. L'incidence des limites de l'ACV et des hypothèses effectuées est analysée de manière critique. Cette dernière phase d'interprétation peut être complétée par la mise en relation des aspects environnementaux et des aspects économiques ou sociaux. »

Pour résumer, il s'agit d'une combinaison des phases de discussion et conclusions d'une démarche scientifique. Les normes ISO 14 040 et 14 044 soulignent que cette phase est en lien direct avec le champ de l'étude défini dans la première phase d'une étude ACV. Trois objectifs résument bien cette phase :

- De tirer des conclusions face aux résultats
- D'expliquer les limites de la modélisation et de l'interprétation
- De fournir des recommandations aux requérants de l'étude

2.1.3 Résumé et irrégularités dans l'application du cadre méthodologique

Le résumé de la méthode ACV présenté dans cette section indique que les standards ISO 14 040 et 14 044 soulignent clairement qu'il est nécessaire de considérer les spécificités spatiotemporelles. Ces considérations doivent permettre d'atteindre un niveau de représentativité suffisant pour que les impacts environnementaux sur le cycle de vie de différentes alternatives soient différentiables. Cette représentativité doit affecter la modélisation des systèmes et des impacts environnementaux.

Toutefois, il est difficile de spécifier un niveau requis de considération des spécificités spatiotemporelles lors de la mise en œuvre des ACV puisque ce niveau peut varier différemment pour chaque étude. Cette variation est par ailleurs constatée comme l'indique la remarque *g)* de la page 9 de la norme 14 040 :

g) « Il n'existe pas de méthode unique de réalisation d'ACV. Les organismes ont la flexibilité nécessaire pour mettre en pratique l'ACV conformément à la présente norme internationale, conformément à chaque application spécifique et des exigences de l'utilisateur ; »

Une description de l'historique des développements sur un aspect spécifique devient, par conséquent, nécessaire pour une meilleure évaluation de l'état de l'art. La section 2.2 se penche donc sur l'historique des considérations spatiotemporelles pour la méthode ACV. C'est cet historique qui permet l'identification des forces et faiblesses générales de la méthode sur le sujet en lien avec l'objectif général de la thèse.

[i] Il faut noter que les aspects spatiotemporels qui touchent cette phase ne lui sont pas spécifiques puisqu'ils sont en lien avec les considérations des autres phases. C'est pour cette raison que la 4e phase n'est pas détaillée dans une section du 2e chapitre.

2.2 Historique de développement des considérations spatiotemporelles

Cette section définit le fondement des travaux de la thèse en faisant un retour sur l'historique des développements pour la considération des spécificités spatiotemporelles dans le cadre de la méthode ACV. Cette analyse permet d'identifier certaines forces ou faiblesses de la considération des spécificités spatiotemporelles pour la modélisation ACV. C'est donc la combinaison des forces et faiblesses identifiées qui sert de fondation pour la proposition de nouveaux développements.

2.2.1 Evolution générale

Plusieurs publications portent sur l'évolution de la méthode ACV et elles soulignent toutes le besoin de considérer les caractéristiques spatiales et temporelles lors d'une modélisation ACV. Certains articles soulignent l'importance des spécificités dans l'étape de modélisation du système et d'autres dans la phase de modélisation des impacts environnementaux. Certaines explications supportant ces commentaires sont toutefois peu détaillées. Le tableau 2-1 présente une liste non exhaustive de ces documents, mais qui est représentative du débat initié depuis une quinzaine d'années. Cette sous-section vient donc confirmer les affirmations sur la pertinence de considérer les spécificités spatiotemporelles qui se retrouvent dans les normes et ouvrages présentés dans la section 2.1.

Tableau 2-1 : Liste de publications portant, en partie ou exclusivement, sur les considérations spatiales et temporelles pour une modélisation ACV. Il s'agit d'une liste non exhaustive des publications fréquemment référées

Références	Titre
(Potting and Hauschild 1997)	Spatial differentiation in Life-Cycle Assessment via the Site-Dependent Characterization of Environmental Impact from Emissions
(Rebitzer *et al*. 2004)	Life cycle assessment Part 1 : Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications
(Pennington *et al*. 2004)	Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice
(de Haes *et al*. 2004)	Three Strategies to Overcome the Limitations of Life-Cycle Assessment
(Potting and Hauschild 2006)	Spatial differentiation in life cycle impact assessment – A decade of method development to increase the environmental realism of LCIA
(Reap *et al*. 2008)	A survey of unresolved problems in life cycle assessment
(Finnveden *et al*. 2009)	Recent developments in Life Cycle Assessment
(Guinee *et al*. 2011)	Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future

Toutefois, Hofstetter *et al.* (2002) résume bien le problème identifié en soulignant une hypothèse qui est souvent faite dans les études ACV contemporaines :

« Les dimensions spatiale et temporelle ne sont en général pas différenciées et les résultats le plus souvent agrégés spatialement et temporellement. L'environnement dans lequel se trouve le système ne se modifie pas, seul le système étudié change. »

Analyse de l'évolution générale de la méthode ACV

Toutes ces publications divisent la discussion entre les considérations spatiales et temporelles. Certaines discutent d'ailleurs quasi exclusivement des spécificités spatiales. Il y a une claire démarcation dans le traitement et le niveau d'évolution des considérations pour ces deux notions. Il semble donc pertinent de continuer l'analyse en divisant les considérations spatiales et temporelles. Il faut cependant remarquer que la structure de développement de ces deux notions se rejoint à plusieurs égards.

2.2.2 Développements au niveau spatial

Les considérations spatiales se sont développées dans la méthode ACV depuis ses débuts. La pertinence de la considération de différents aspects spatiaux a d'ailleurs été un sujet de discussion dès que la méthode a été développée (Potting and Hauschild 2006). Les experts du domaine n'étaient, en effet, pas tous d'accord sur l'importance de désagréger les systèmes globaux au niveau spatial puisque ce travail complexifie nécessairement la modélisation ACV. Le travail supplémentaire de désagrégation lié à une complexification importante et une augmentation du temps de recherche d'informations doit donc être justifié.

Importance des spécificités spatiales

La justification de la considération des spécificités spatiales s'est construite à partir d'exemples démontrant des différences notables entre certains résultats d'études ACV considérant ou ne considérant pas ces différences pour la modélisation des systèmes et des impacts environnementaux. Le tableau 2-2 présente des publications décrivant quelques-unes de ces études.

Tableau 2-2 : Liste d'études soulignant l'importance des spécificités spatiales dans les résultats d'ACV

Références	Titres
(Potting and Blok 1995)	Life cycle assessment of four types of floor covering
(Ross and Evans 2002)	Excluding Site-Specific Data from LCA Inventory
(Moriguchi and Terazono 2000)	A simplified model for spatially differentiated impact assessment of air emissions
(Nigge 2001)	Generic spatial classes for human health impacts, part II: Application in an Life Cycle assessment of natural gas vehicles
(Finnveden and Nilsson 2005)	Site-dependent Life-Cycle Impact Assessment in Sweden
(Bellekom *et al*. 2006)	Feasibility of Applying Site-Dependent Impact Assessment of Acidification in LCA
(Yi *et al*. 2007)	Development of the Interregional I/O Based LCA Method Considering Region-Specifics of Indirect Effects in Regional Evaluation

La première raison identifiée expliquant l'importance de la variabilité des effets des flux élémentaires dans différentes régions est liée à la sensibilité de l'environnement qui dépend d'une multitude de paramètres. Cet aspect était d'ailleurs déjà souligné dans les premières études ACV des années 90 (Alting et al. 1997; Potting and Blok 1995). Les aspects variables d'un site peuvent se définir sous différentes catégories comme la géologie, la topographie, la couverture du terrain et les conditions météorologiques (Reap *et al*. 2008).

Plus récemment, une importante variabilité des facteurs d'ingestion « intake fraction » en fonction de la spatialisation des émissions de substances a été démontrée pour l'Europe (Pennington et al. 2005; Potting et al. 1998) et le Canada (Manneh *et al*. 2010). Une autre étude a évalué une variabilité de trois ordres de grandeur pour l'effet d'acidification ou d'eutrophisation provenant de certains flux élémentaires dans différentes régions de l'Europe (Huijbregts et al. 2001; Potting et al. 1998). Ces facteurs d'effet sont reliés linéairement aux FCs des méthodes de modélisation d'impacts sur la santé humaine. Ces exemples qui présentent des variabilités de plusieurs ordres de grandeur entre différents sites pour les sources de flux élémentaires, confirment la nécessité de considérer les spécificités spatiales.

Certaines des études du tableau 2-2 ont aussi démontré, plus spécifiquement, la variabilité de certaines catégories d'impacts environnementaux en fonction de la spécificité spatiale des flux élémentaires. Il est important de distinguer les catégories d'impacts globaux et celles d'impacts régionaux. Le réchauffement climatique et la destruction de la couche d'ozone sont des catégories d'impacts globaux. L'eutrophisation (aquatique et terrestre), l'acidification (aquatique et terrestre), la formation d'ozone photochimique, la toxicité humaine, l'écotoxicité, l'utilisation des terres, la consommation d'eau et l'utilisation des ressources abiotiques et biotiques sont, quant à elles, des catégories d'impacts régionaux (Sonnemann *et al*. 2011).

Proposition actuelle de méthodes de modélisation des impacts environnementaux

La justification de l'importance de considérer la variabilité spatiale dans la modélisation des impacts environnementaux a guidé la création de plusieurs méthodes considérant l'effet d'une variabilité spatiale des sources de flux élémentaires. Différentes publications décrivent une liste de paramètres qui doivent être considérés pour faire ce type de modélisation (Bare et al. 1999; Owens 1997; Pennington et al. 2004; Potting and Hauschild 1997; Reap et al. 2008). L'idée est en fait de considérer la variabilité spatiale des mécanismes environnementaux qui servent à définir les FCs pour différentes méthodes.

Malgré l'existence de ces méthodes de modélisation d'impacts, des recommandations des normes ISO 14 040 et 14 044 et des recommandations[i] d'autres documents de référence (ILCD 2010; Jolliet *et al*. 2010), les caractéristiques spatiales sont encore rarement considérées dans les études ACV actuelles (Finnveden et al. 2009; Potting and Hauschild 2006; Reap et al. 2008). Il semble donc qu'il y existe encore des freins aux considérations spatiales lors d'une modélisation ACV.

Freins à la considération des spécificités spatiales lors d'une modélisation de système

Trouver les freins de ce type n'est pas simple, mais il faut remarquer que la discussion sur la modélisation des systèmes caractérisés au niveau spatial n'est pas aussi aboutie que celle de la modélisation des impacts environnementaux. Il existe quelques publications sur cette question (Collinge et al. 2012; de Haes et al. 2004; Finnveden et al. 2009; Rebitzer et al. 2004; Ross and Evans 2002).

La procédure normative de la norme ISO 14 044 indique qu'il faut regrouper les données de modélisation des systèmes pour constituer l'inventaire de cycle de vie avant la modélisation des impacts environnementaux (figure 1 de la norme). Cette procédure peut être perçue par certains comme un obstacle à la considération des spécificités spatiales. Toutefois, la norme n'indique pas clairement comment les données doivent être regroupées. Dissocier les flux élémentaires d'un ICV en fonction de leurs caractérisations spatiales est donc envisageable. Le calcul d'un ICV caractérisé au niveau spatial ne semble donc pas contraire à la norme. Il faut toutefois souligner que la modélisation des systèmes s'est toujours faite avec un certain niveau de caractérisation spatiale (voir sous-section 2.4.1 pour le

[i] L'agrégation spatiotemporelle des flux élémentaires d'un scénario peut limiter les possibilités d'analyse des résultats. La représentativité spatiotemporelle des données devrait être décrite par des facteurs d'incertitude et un certain niveau de qualité devrait être visé lors de l'accomplissement d'une étude.

détail) et que la troisième version de la BDD ecoinvent (Weidema *et al*. 2012) propose un nouveau type d'information spatiale plus précis qui est lié à un nouveau mode de caractérisation. Il s'agit du mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires et du mode de caractérisation spatiale des processus. La description détaillée de ces modes de caractérisation spatiale est présentée à la sous-section 2.4.1. C'est en partie dans ces modes qu'une piste de solution est recherchée pour une mise en œuvre plus fréquente dans les études ACV.

Le niveau de description spatiale actuelle des différentes valeurs définissant des processus et systèmes dans une BDD est aussi un frein à la considération des spécificités spatiales dans différentes études ACV. En effet, le descriptif spatial nécessaire pour lier des flux élémentaires aux FCs n'est pas toujours disponible. Une discussion plus approfondie sur ce sujet est présentée tout au long du document pour mieux comprendre pourquoi ce frein majeur existe et comment il est envisagé de le résoudre.

Un premier consensus sur cette question de la caractérisation spatiale des BDDs vient tout juste d'apparaître dans les principes de Shonan (2011) mais il ne défini pas clairement pourquoi les caractéristiques spatiales retenues sont nécessaires à la sélection des FCs pertinents pour une modélisation des impacts environnementaux plus représentatif. En effet, les caractéristiques spatiotemporelles qu'il est maintenant suggéré de renseigner sont :

- Des informations sur le site
- Les conditions géographiques (type d'environnement de référence)
    - Type de sol, disponibilité de l'eau…
- Les propriétés spécifiques au site qui ne sont pas lié directement à l'environnement
    - Hauteur d'une cheminé, la densité de population et région urbain ou rurale

L'ajout d'information liée à la caractérisation spatiale pourra aussi mener à une limitation dans la capacité de calcul des ordinateurs utilisés actuellement. Toutefois, ce problème est difficile à évaluer puisqu'il n'est pas rencontré actuellement et que les sources de données contemporaines ne permettent pas d'identifier explicitement le potentiel de gravité de ce genre de frein.

Analyse des développements actuels au niveau spatial

L'analyse des développements récents de la méthode ACV permet d'identifier deux forces et une faiblesse pour la considération des spécificités spatiales lors de la mise en œuvre dans différentes études ACV :

L'importance de considérer les spécificités spatiales pour la modélisation des systèmes et de certaines catégories d'impacts environnementaux a été démontrée par plusieurs études

Il existe maintenant quelques méthodes de modélisation des impacts environnementaux qui considèrent les spécificités spatiales de l'environnement face à différents types de flux élémentaires

La caractérisation spatiale des BDDs actuelles ne correspond pas complètement aux besoins des méthodes de modélisation des impacts environnementaux considérant la variabilité spatiale

2.2.3 Développements au niveau temporel

La considération des aspects temporels en ACV n'a pas atteint le même niveau de développement que celles sur les aspects spatiaux. Cependant, encore une fois, l'augmentation de la quantité de travail, liée à la désagrégation de l'information, doit être justifiée.

Reap *et al*. (2008) discutent de la considération des spécificités temporelles pour la méthode ACV. Ils expliquent qu'aujourd'hui, l'ACV est un outil décrivant un système à l'état stationnaire. Aucun effet dynamique n'est considéré. En d'autres mots, la caractérisation temporelle des flux (élémentaires et de processus) d'un système et avec son environnement n'est pas renseignée dans les BDDs. La négligence de l'aspect temporel oblige les ACV actuelles à faire une moyenne des flux de polluants et de la réponse des écosystèmes.

Au niveau général, il faut aussi indiquer que la question temporelle dans la méthode ACV a amené l'utilisation du terme dynamique et que celui-ci est maintenant fréquemment utilisé. Plusieurs des publications décrivant la considération des spécificités temporelles sont donc définies comme étant des études ACV dynamiques. Le terme dynamique n'est toutefois pas encore défini au niveau des documents de référence et il est actuellement utilisé pour décrire différentes facettes de la considération d'aspects temporels. Il peut s'agir soit d'une caractérisation temporelle explicite des systèmes lors de leurs modélisations ou d'une considération explicite de la variabilité temporelle des impacts environnementaux de différentes émissions dans le temps.

Importance des spécificités temporelles

Il existe aujourd'hui quelques exemples d'études dynamiques qui démontrent la pertinence de considérer la variabilité temporelle lors de la modélisation des systèmes et des impacts environnementaux (Collinge et al. 2012; Herfray and Peuportier 2012; Kendall et al. 2009a; Kendall et al. 2009b; Levasseur et al. 2010; Pehnt 2006).

Une publication a aussi démontré une variabilité temporelle d'environ deux ordres de grandeur pour l'exposition humaine aux NO_x en fonction du moment de leurs émissions (Shah and Ries 2009). Comme pour la variabilité spatiale, la variabilité temporelle est importante pour certaines catégories d'impact.

Des catégories d'impacts identifiées comme étant sujettes à une variation temporelle de l'émission sont, par exemple, la consommation d'eau, la disponibilité en eau, les émissions de gaz à effet de serre en fonction de l'utilisation du territoire et la création d'oxydants photochimiques (Sonnemann *et al*. 2011). Field *et al*. (2000) ajoutent que l'importance de la caractérisation temporelle d'un système sur des effets environnementaux transitoires dépend normalement de l'horizon temporel choisi dans l'analyse.

Cependant, aucune étude dynamique n'a évalué la variation des impacts environnementaux en fonction des moments d'émission pour une chaîne de production complexe décrite à partir d'une BDD. Cette lacune ne permet pas de confirmer l'importance de ce type de variabilité temporelle lors de la modélisation ACV.

Proposition actuelle d'une méthode de modélisation des impacts environnementaux

Une des études ACV dynamiques démontrant la variabilité des résultats présente aussi la méthode de modélisation des impacts développée qui intègre la considération d'aspects temporels. Cette méthode de modélisation des impacts environnementaux a été développée pour l'évaluation des effets des GES en fonction de différents horizons temporels (Levasseur et al. 2010). Cette méthode de modélisation dynamique des impacts environnementaux nécessite donc une connaissance sur la durée des flux élémentaires par rapport à l'horizon temporel considéré. Cette particularité est importante puisque le moment d'émission n'est pas encore considéré dans une méthode de modélisation dynamique.

Spécificités temporelles lors de la modélisation des systèmes

Très peu d'informations temporelles sont disponibles dans les BDDs actuelles. La seule information qui est donnée est liée à la période de validité des définitions des processus. Ce type d'information n'est cependant pas utile pour définir les moments ou périodes des scénarios lors de la modélisation des systèmes et des impacts environnementaux. Les différentes études d'ACV dynamique publiées (Collet et al. 2011; Collinge et al. 2011; Collinge et al. 2012; Herfray and Peuportier 2012; Kendall et al. 2009b; Pehnt 2006) ont donc du modéliser le système à partir d'autres sources d'information. La majorité d'entre elles n'ont pas pu modéliser des systèmes très complexes avec un niveau de désagrégation important au niveau des processus. D'ailleurs, seule l'étude de Levasseur *et al*. (2010) décrit précisément comment le système a été modélisé au niveau temporel.

Analyse des développements actuels au niveau temporel

L'analyse des développements récents de la méthode ACV permet d'identifier deux forces et deux faiblesses pour la considération des spécificités temporelles lors de la mise en œuvre dans différentes études ACV :

L'utilisation du terme dynamique pose problème à cause de son utilisation pour différents concepts

La considération des spécificités temporelles pour la modélisation des systèmes pour certaines catégories d'impacts environnementaux a été démontrée comme importante par quelques études

Il existe maintenant une méthode de modélisation des impacts environnementaux qui considèrent les spécificités temporelles de l'environnement face à un type de flux élémentaires

La caractérisation temporelle des BDDs actuelles est quasi inexistante ce qui engendre une modélisation très peu précise des impacts environnementaux face à ce qui est réellement subit

2.3 Phase 1 : Définition des objectifs et du champ de l'étude

L'objectif dans cette section est de confirmer, par des exemples, que les règles décrivant la première phase d'une étude ACV offrent un cadre méthodologique suffisant pour identifier les spécificités spatiotemporelles qui doivent être considérées. Ces mêmes exemples indiquent pourquoi les sources d'informations utilisées dans les études ACV ne possèdent pas une caractérisation spatiotemporelle suffisante.

2.3.1 Définition des objectifs

Les objectifs d'une étude ACV imposent une considération des spécificités spatiotemporelles pour la modélisation ACV. En effet, il faut modéliser le système et les impacts environnementaux afin que l'évaluation environnementale soit suffisamment représentative pour atteindre l'objectif d'une étude. L'exemple 2-1 décrit quelques une des spécificités spatiotemporelles qu'il faut considérer pour deux objectifs liés à l'évaluation de la durabilité environnementale de la production d'électricité par des installations photovoltaïques.

Exemple 2-1 Nécessité de correspondance entre les objectifs d'une étude ACV et les considérations spatiotemporelles de la modélisation ACV pour l'évaluation environnementale de la production d'électricité par différents scénarios d'installations photovoltaïques.

Une étude qui vise à évaluer la durabilité environnementale de la production d'électricité d'une installation photovoltaïque particulière doit être représentative des considérations spatiotemporelles de cette installation. Le site de production de l'électricité est important pour estimer la ressource solaire disponible. Le type de modules utilisé est lié à une fabrication dans une région spécifique qui peut être différente de celle de la production d'électricité. Le transport des composantes de l'installation dépend aussi de la localisation de l'installation par rapport aux différents fournisseurs. Les années de production d'électricité sont importantes pour l'estimation de la disponibilité de la ressource solaire. Une imprécision sur ces aspects guide d'ailleurs vers une imprécision sur les résultats des études ACV qui peut atteindre jusqu'à un ordre de grandeur pour la comparaison de systèmes photovoltaïques en Europe (Beloin-Saint-Pierre et al. 2009; Jungbluth et al. 2008; Reich et al. 2011).

L'évaluation environnementale de la production d'électricité moyenne d'installations photovoltaïques d'un pays nécessite d'autres hypothèses pour les considérations spatiotemporelles (de Wild-Scholten 2011). Il est dans ce cas, nécessaire de faire une évaluation de la distribution des sites d'installations et de faire la correspondance avec la disponibilité des ressources solaires. L'année de l'étude donnera, pour ce type d'objectif, une idée des technologies utilisées et donc des performances des installations. Le transport entre les fournisseurs et les sites de production devient aussi plus complexe à modéliser à cause de la dissémination des installations sur le territoire.

Les spécificités spatiotemporelles de la modélisation des systèmes sont clairement liées aux objectifs de l'exemple 2-1. En effet, le type de système qui doit être évalué définit le domaine spatiotemporel à considérer pour caractériser certains processus du système.

2.3.2 Définition du champ de l'étude

Seuls les éléments qui sont touchés par des spécificités spatiotemporelles sont décrits dans cette sous-section (voir annexe 4 pour la liste complète). Il est utile de comprendre, pour ces cas spécifiques, ce qui est proposé aujourd'hui afin d'identifier les limites de ces propositions.

Modélisation de la structure d'un système

La figure 2.2 donne un exemple de système avec une description de différentes parties d'un cycle de vie et des liens entre ces parties et avec l'environnement externe au système considéré.

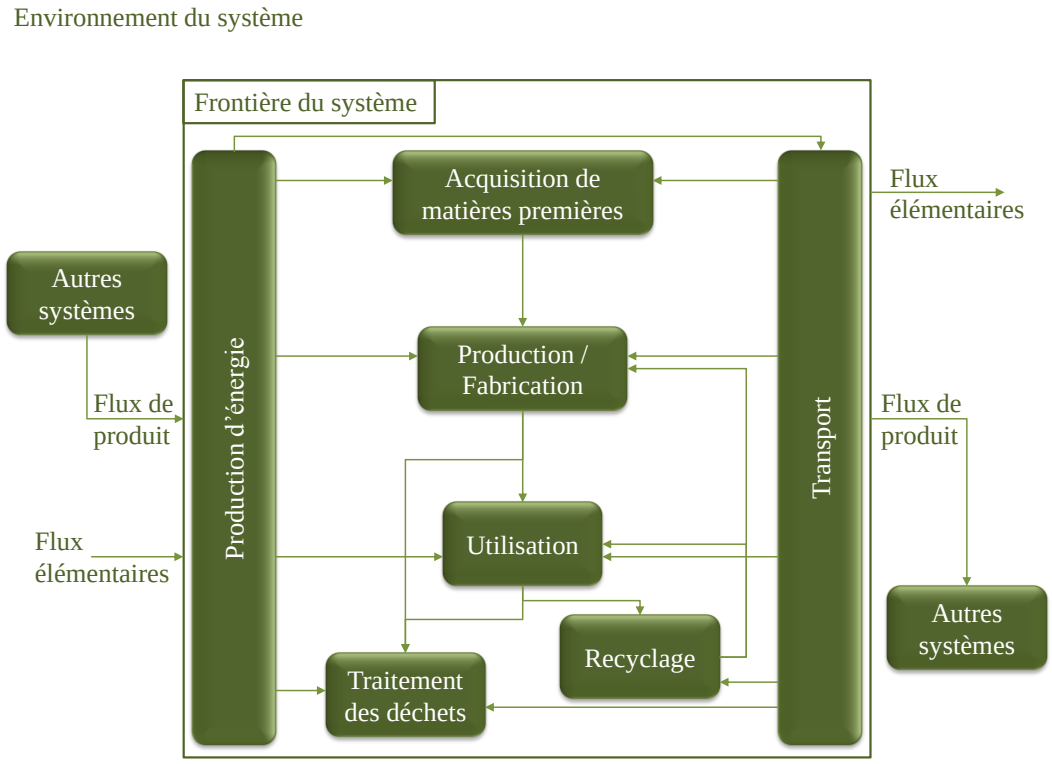


Figure 2.2 : Schéma simplifié de la structure d'un système et de ses différentes parties. Inspiré d'ISO 14 040.

Définition des frontières du système

L'objectif conceptuel des études ACV est de modéliser le cycle de vie complet (modélisation systémique) de différents scénarios, mais il est impossible de tout considérer. Il est donc nécessaire de définir les limites du système modélisé. L'étape de définition des frontières du système sert à définir ces limites en indiquant les parties qui sont considérées et celles qui ne le sont pas. Il faut noter que chaque partie du cycle de vie peut être constituée d'une multitude de processus. La définition des frontières sert donc à définir le cadre de la figure 2.2. Des scénarios peuvent être comparés si les frontières de leurs systèmes sont comparables.

Voici quelques règles importantes pour s'assurer que les comparaisons entre différents scénarios sont équivalentes au niveau du système considéré (Jolliet *et al*. 2010) (p. 39-40) :

1. *« Les limites du système doivent recouvrir la même réalité fonctionnelle pour les différents scénarios d'une étude »*
    - Cette règle peut vouloir dire qu'il est pertinent que les systèmes modélisés se comparent au niveau du moment et lieu de disponibilité. Les analystes font traditionnellement attention à cette condition, mais une caractérisation plus précise du système au niveau spatiotemporel simplifierait l'évaluation de cette correspondance.

2. *« Sont retenus dans le système l'ensemble des processus qui contribuent à plus de x% de la masse des intrants, à plus x% de la consommation énergétique ou à plus de x% des émissions de polluant. Le pourcentage seuil de x% est préalablement fixé, par exemple à 1% ou 3% »*
    - Le concept relié à cette règle est de permettre la définition d'une limite basée sur des mesures quantitatives en lien avec ce qui est connu. Il serait pertinent de délimiter le domaine temporel du cycle de vie du système modélisée pour suivre cette logique. Il serait ainsi plus simple de comprendre jusqu'où on considère le passé et le futur du scénario. Les limites spatiales des systèmes qui ne sont pas internationaux devraient aussi être définies.
3. *« Les étapes identiques (processus élémentaires) dans les différents scénarios peuvent être exclues à condition que les flux de référence affectés par ces processus soient strictement égaux (sortants totaux du système également identiques) »*
    - Le nombre de processus qui sont considérés comme équivalent risque de diminuer si la réalité spatiotemporelle de ceux-ci est considérée. Il est donc peu utile de conserver cette règle dans la définition des limites de la modélisation.

Ces règles de définition des frontières du système indiquent pourquoi il est utile de considérer certaines caractéristiques spatiotemporelles lors de la description des frontières du système.

Définition de l'unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle (UF) doit être cohérente avec les objectifs d'une étude ACV. Elle doit démontrer une correspondance avec les possibles considérations spatiotemporelles liées à ces objectifs. Elle sert de référence quantitative par rapport à laquelle il faut calculer les ICVs et impacts environnementaux reliés à la fonction identifiée pour les scénarios d'évaluation de durabilité environnementale.

Un paramètre temporel clé de l'UF est la durée de vie du système permettant de répondre à la fonction. Cette considération temporelle est nécessaire pour la comparaison quantitative de plusieurs systèmes ayant la même fonction, mais pas nécessairement la même durabilité de production. Un paramètre spatial qui est moins fréquemment considéré est le site de production du système. La production d'énergie renouvelable est un bon exemple de fonction où il est nécessaire d'ajouter cette considération spatiale à l'UF puisque la production dépend directement de la disponibilité de la ressource qui est liée à la localisation d'une installation. L'exemple 2-1 (page 2-14) décrit d'ailleurs ce besoin de considération de la spatialité dans la fonction du système.

Jolliet *et al* (2010) proposent que l'UF soit mesurable et additive. Il n'est cependant pas proposé de définir le domaine de validité de cette additivité. Un domaine de validité spatiotemporelle de l'UF pourrait être utile pour identifier rapidement la portée des résultats de l'ACV. En d'autres mots, il pourrait être utile de définir la région et la période de temps, pour laquelle il est possible de dire que l'impact lié à deux UF est équivalent au *double* de l'impact lié à une UF. Cet ajout d'information nécessite qu'on évalue la capacité de production des processus directement liés à l'UF. Il est intéressant de noter que la 3e version de la BDD ecoinvent (Weidema *et al*. 2012) requiert cette information dans la définition de processus décrivant des infrastructures même si les normes ISO 14 040 et 14 044 ne le requièrent pas.

2.4 Phase 2 : Modélisation du système et calcul d'inventaire cycle de vie

La section 2.4 décrit l'exigence sur la qualité des données, les modes de caractérisation spatiale et temporelle existants pour la modélisation des processus de différents systèmes et comment cette information est propagée lors du calcul des ICVs. Les descriptions se fondent sur la définition de processus pour des BDDs.

2.4.1 Modélisation et caractérisation spatiotemporelle des systèmes

Exigences de qualité sur les données

La considération des caractéristiques spatiales et temporelles des différentes parties d'un système est recherchée si ces caractéristiques sont importantes pour la représentativité de la modélisation des impacts environnementaux. Les données utilisées pour décrire le système analysé doivent donc être les plus représentatives possible des scénarios tant au niveau des processus technologiques nécessaires, des ressources naturelles utilisées que pour les moments ou les endroits où sont utilisés ces processus et ces ressources. L'exemple 2-2 décrit ainsi le type d'information spatiotemporelle qui doit être considéré, au niveau de la qualité des données, dans une étude ACV.

Exemple 2-2 Considérations spatiotemporelles souhaitables pour une modélisation ACV représentative de la production d'énergie en France

Plusieurs facteurs et hypothèses doivent être définis pour faire la modélisation de la production d'énergie en France, mais plus les données utilisées sont représentatives de la réalité, plus l'analyse sera utile au développement de la filière. Il faut donc, en premier lieu, définir les processus nécessaires à la fabrication des installations (centrales) constituant ce système. Le moment de fabrication des centrales permet ensuite d'évaluer le type de technologie utilisé et la provenance des matériaux. Une évaluation du profil temporel de la distribution des centrales dans le temps peut aussi être utile pour connaître la provenance des combustibles utilisés et l'utilisation de cette électricité. La localisation des centrales peut, quant à elle, être utile pour évaluer le transport nécessaire pour amener les combustibles et la distance de transport de l'électricité, donc les pertes. La localisation des centrales est encore plus importante quand il faut modéliser la production à partir de sources d'énergie renouvelables. En effet, la ressource énergétique disponible est estimée à partir de la localisation de l'installation. La définition de la période de production d'électricité peut aussi être utile pour connaître la disponibilité des centrales (il n'y a pas de production d'électricité la nuit pour les installations PV).

Il est important de spécifier que les informations spatiotemporelles définies dans l'exemple 2-2 sont souhaitables pour la modélisation de système de production d'électricité, mais qu'il est très rare que ce niveau de détail soit atteint dans les études ACV contemporaines (mentionné dans la section 2.2). En effet, la quasi-totalité des études qui sont publiées aujourd'hui utilise des BDDs (voir sous-section 2.4.1) qui ne sont que partiellement représentatives au niveau spatiotemporel. L'information spatiale est souvent disponible, mais à différents niveaux de précision. L'information temporelle est quant à elle, non explicite sauf pour la période de validité des informations. De plus, l'information utilisée pour la description de système complexe comme la production d'électricité d'un pays utilise souvent des informations qui sont non représentatives aux niveaux spatial et temporel. Ce manque de représentativité s'explique surtout par un manque de données sources. Il semble que les créateurs de BDDs préfèrent combler les manques de données avec des processus comparables. Le problème n'est donc pas dans les principes généraux de la méthode, mais dans la disponibilité d'informations qui sont liées à la situation spatiotemporelle spécifique. L'exemple 2-3 décrit un manque de représentativité pour les données servant à modéliser des centrales hydroélectriques dans la BDD ecoinvent 2.2.

Exemple 2-3 Information utilisée pour la modélisation des centrales hydroélectriques dans ecoinvent v2.2

La base de données ecoinvent 2.2 décrit la production hydroélectrique de plusieurs pays dans sa base de données. Ces informations sont très utilisées pour modéliser la production énergétique de tous les pays européens où une partie de l'électricité est produite par des centrales hydroélectriques. A leur tour, ces processus de production électrique sont utilisés lors de la modélisation de tous les systèmes où il existe une consommation d'électricité. Il y a donc une majorité des scénarios qui considère les impacts environnementaux de la production hydroélectrique provenant de cette description.

L'information sur ces centrales est donc fréquemment utilisée, mais le manque de données sources pour la modélisation de la production hydroélectrique oblige les responsables d'ecoinvent à utiliser les seules données qui leur sont disponibles ; c'est-à-dire la description de deux centrales hydroélectriques suisse (ecoinvent_report_05). Ces centrales peuvent difficilement être représentatives de toutes les centrales hydroélectriques qui ont été construites à différents moments et en différents pays européens. Il devient alors difficile d'évaluer l'importance de ce manque de représentativité entre les études surtout en l'absence d'études sur la variabilité d'impacts environnementaux entre différentes centrales.

Le manque de représentativité spatiotemporelle en ACV est donc premièrement lié au manque d'information des BDDs. Cependant, l'effet de ce manque d'information sur la représentativité des résultats d'ACV est, en ce moment, difficile à évaluer puisque ces mêmes informations sont nécessaires pour faire ce type d'évaluation.

Modélisation des systèmes

C'est dans la première phase d'une étude ACV que la structure et le cadre des systèmes sont définis. La deuxième phase de l'étude se concentre plutôt sur la quantification des flux décrivant les liens entre les processus (flux de processus) et les liens entre les processus et l'environnement (flux élémentaires). La figure 2.3 présente une description schématique des flux et processus qui doivent être définis pour modéliser une partie d'un système.

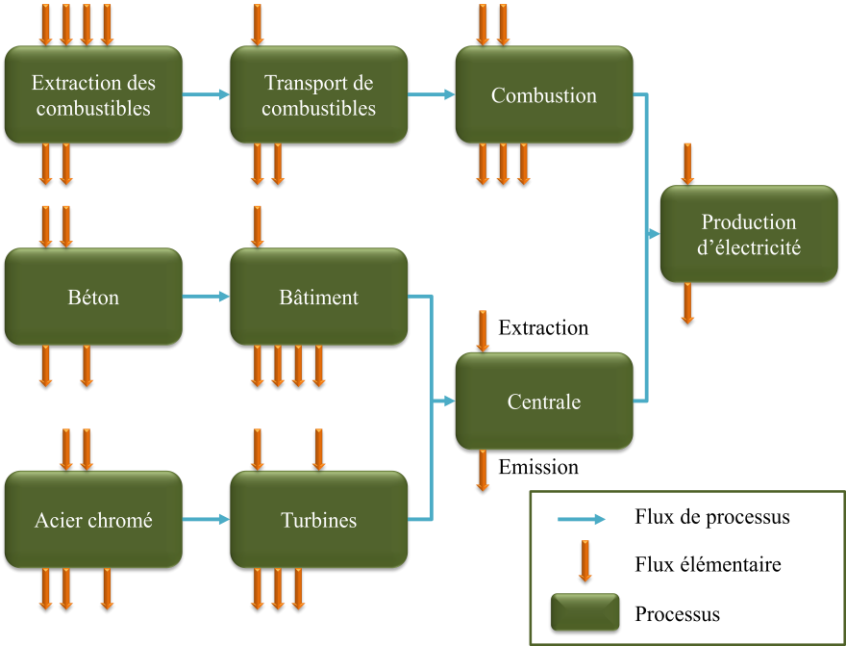


Figure 2.3 : Schéma décrivant un exemple d'une partie d'un système de production d'électricité. Ce système est composé de processus, de flux de processus et de flux élémentaires. Les flux élémentaires se divisent en 2 catégories que sont les extractions (entrants d'un processus) et émissions (sortants d'un processus).

Il n'existe actuellement aucune exigence particulière sur la caractérisation spatiotemporelle et sa précision pour la description des flux d'un système. C'est-à-dire que la méthode ACV suggère d'être le plus représentatif et le plus transparent possible lors de cette modélisation, mais aucune règle spécifique n'est définie. Les seules exigences sont plutôt fixées par les besoins des méthodes de modélisation des impacts environnementaux (voir la discussion de la section 2.5).

Il est important de souligner que l'ajout de caractéristiques spatiotemporelles à la définition d'un processus diminue toujours la généricité de celui-ci. Par exemple, un processus qui décrit spécifiquement la production d'électricité par une installation PV à Lyon ne devrait pas être réutilisé pour la description de la production d'électricité par une installation PV à Nice. Cette perte de généricité est toujours reliée à une augmentation de la charge de travail pour la modélisation du système. Toutefois, ce type d'information peut être critique pour la représentativité de la modélisation et pour augmenter la précision des résultats de modélisation des impacts environnementaux.

Il existe une multitude de sources d'informations qui peuvent être utilisées pour modéliser un système avec la méthode ACV. Les principes de Shonan (Sonnemann *et al*. 2011) fournissent une liste non exhaustive de ces sources :

- Des mesures faites par les partenaires ou l'analyste responsable de l'étude
- Des statistiques provenant de différents organismes du secteur en lien avec l'étude
- Des estimations faites par l'analyste pour les données manquantes
- Les BDDs construites spécifiquement pour les études ACV (voir annexe 5)

Les informations qui se trouvent dans les BDDs du domaine de l'ACV doivent être utiles à différentes études ACV. Les caractéristiques spatiotemporelles renseignées dans ce type de BDDs devraient donc être pertinentes à la modélisation des systèmes pour différentes études ACV. L'analyse des modes de caractérisation spatiale et temporelle de ce type de BDD est donc pertinente pour évaluer le niveau de développement de cet aspect et doit s'appliquer à toute autre source d'information.

Sources d'information : les BDDs du domaine de l'ACV

Plusieurs caractéristiques spatiotemporelles peuvent servir à la définition d'un processus et des flux le constituant. Voici une liste d'informations requises selon différents experts :

- Validité temporelle de la définition du processus (Jolliet *et al*. 2010; Sonnemann *et al*. 2011)
- Validité géographique de la définition du processus (Jolliet *et al*. 2010; Sonnemann *et al*. 2011)
- Identification des émissions à long terme (ILCD 2010)
- Les limites physiques du processus (Sonnemann *et al*. 2011)
- Le contexte temporel (Sonnemann *et al*. 2011)
    - L'année de recueil des données
    - L'année des calculs
    - Période de variation des émissions
    - L'année représentée (si agrégation horizontale de processus)

Le chapitre 5 du document décrivant les principes de Shonan (Sonnemann *et al*. 2011) propose de nouvelles caractéristiques spatiotemporelles à ajouter à la description des processus. Il s'agit des :

- Conditions géographiques de l'environnement
- Propriétés du site qui ne sont pas reliées à la géographie
- Une information sur le moment où se produit un flux élémentaire

Différentes BDDs possèdent toutefois des particularités au niveau du mode de caractérisation spatiale. Il est donc intéressant de diviser la discussion en fonction de ces différences.

Mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 1.0 (ex : ecoinvent v2.X)

Les BDDs actuelles utilisent une caractérisation spatiale peu descriptive qui permet une analyse des impacts environnementaux considérant, grossièrement, l'effet des flux élémentaires en fonction de compartiments et sous-compartiments environnementaux. Ce mode de caractérisation tient sa source d'une proposition qui peut être trouvée au sein d'une publication de Potting et Hauschild (1997). La discussion de la section 2.5 sur les méthodes d'analyse des impacts environnementaux permettra de comprendre pourquoi cette caractérisation spatiale est qualifiée de peu descriptive, voire insuffisante. Il faut toutefois indiquer que, malgré le faible niveau de description, cette forme de caractérisation spatiale est nécessaire à la modélisation des impacts environnementaux.

La caractérisation spatiale des flux élémentaires spécifie, à un premier niveau, le compartiment environnemental où ils ont lieu. Les compartiments de ce niveau sont divisés entre l'air, l'eau et le sol. Cette compartimentation de l'environnement est ensuite sous-divisée, à un deuxième niveau, afin d'apporter des informations supplémentaires utiles à l'identification d'autres interactions potentielles entre les flux élémentaires et l'environnement. Le tableau 2-3 présente les compartiments et sous-compartiments qui sont utilisés par plusieurs méthodes de modélisation d'impacts environnementaux aujourd'hui :

Tableau 2-3 : Description des compartiments et sous-compartiments utilisés dans la description des flux élémentaires. Ces compartiments et sous-compartiments correspondent à une caractérisation spatiale élémentaire.

Compartiments	Sous-compartiments
Air	Non spécifique
	Faible densité de population
	Grande densité de population
	Stratosphère/Troposphère
Eau	Non spécifique
	Réseaux hydrologiques souterrains
	Lac
	Rivières
	Océan
Sol	Non spécifique
	Terrain agricole
	Terrain forestier
	Terrain industriel

La caractérisation spatiale sert, dans ce cas, à améliorer la représentativité des modélisations d'impacts environnementaux sans toutefois donner d'information sur leurs sites géographiques. Il ne semble cependant pas y avoir de raisons qui empêcheraient d'ajouter une rubrique plus spécifique et précise à la liste des sous-compartiments. D'ailleurs, l'ajout d'autres sous-compartiments comme l'intérieur des bâtiments peut être pertinent pour la phase de modélisation des impacts environnementaux. Il faut souligner que ce type d'information est déjà propagé à travers l'étape du calcul d'ICV pour être ensuite utilisé à la phase de modélisation des impacts environnementaux. La méthode de calcul d'ICV décrite dans la sous-section 2.4.2 donne plus de détails sur le lien de cette caractérisation spatiale avec la structure des éléments du calcul. Ce type de caractérisation spatiale peut être utilisé pour caractériser des flux élémentaires peu importe le niveau d'agrégation de processus.

L'ajout de nouvelles informations, plus précise et descriptive, nécessite une réflexion sur le format puisqu'il n'est pas simple d'utiliser une méta-information dans une méthode partiellement automatisée comme l'ACV. Cette possibilité vient tout juste d'être envisagée dans la 3e version d'ecoinvent qui doit voir le jour au cours de l'année 2012.

Mode de caractérisation spatiale des processus 1.0– ecoinvent v.3.0

Une proposition détaillée d'un nouveau mode de caractérisation spatiale plus descriptif et précis de la BDD ecoinvent a vu le jour récemment (Weidema *et al*. 2012). *Elle consiste en la caractérisation spatiale des processus et non des flux élémentaires*. Cette proposition ajoute une information au niveau de la caractérisation spatiale. Il n'y a cependant que très peu d'informations disponibles pour expliquer ce choix. Un récapitulatif des aspects importants est proposé ici pour marquer l'état de l'art dans le domaine de la caractérisation spatiale. Il faut souligner qu'une hypothèse importante doit être faite puisqu'il n'y a pas d'explications spécifiques sur cette question. La description donnée dans le document d'ecoinvent v.3.0 (Weidema *et al*. 2012) semble, en effet, proposer que cette nouvelle forme de caractérisation spatiale se fasse sur les processus et non sur les flux élémentaires à l'opposé du mode de caractérisation des flux élémentaires 1.0.

L'utilisation d'une caractérisation spatiale en lien avec les processus guide implicitement vers le fait que les flux élémentaires reliés à un processus possèdent tous la même caractérisation spatiale. La description de la caractérisation spatiale dans ecoinvent v.3.0 se fait selon trois types : la surface, la ligne et le point. Le tableau 2-4 présente une liste d'exemples de caractéristiques spatiales.

Tableau 2-4 : Exemples de caractérisation spatiale liée aux différents types utilisés dans ecoinvent v.3.0.

Types	Exemples de caractérisation spatiale
Surface	Continent – Europe Pays - France Bassin versant – Var Ville – Sophia Antipolis
Ligne	Routes – rue Claude Daunesse
Point	Bâtiment – Centre énergétique et procédés Latitude/Longitude - 45.555125/-73.668287 Coordonnées GPS -

Ces nouveaux types de régions répondent à une demande de caractérisation spatiale plus précise et plus descriptive des processus élémentaires pour l'utilisation de méthodes de modélisation d'impacts environnementaux qui considèrent les spécificités spatiales de l'environnement. Une liste des régions définies pour la version 3.0 est disponible sur le site web[i]. Le format KML (« Keyhole Markup Language ») est utilisé pour décrire ces régions, qu'il s'agisse de surfaces, lignes ou points. Il est possible d'utiliser des outils comme ArcGIS et Quantum GIS pour définir de nouvelles régions.

Cette nouvelle caractérisation spatiale dans la BDD permet une nouvelle fonctionnalité. Ecoinvent v.3.0 propose, en effet, une liste de processus standards qui seront modifiés à tous les niveaux (valeurs, incertitudes, etc.) en fonction de la région choisie. Il y aura donc un processus de production d'électricité standard pour l'Europe (processus dit parent) et des processus de production d'électricité pour les différents pays de l'Union européenne (processus dit enfants). La sélection du processus le plus représentatif sera laissée à la discrétion de l'analyste qui construit les scénarios d'une étude ACV. La jonction entre les régions potentiellement utilisées dans la base de données ecoinvent v.3.0 et les régions des méthodes de modélisation des impacts environnementaux n'est pas garantie. Toutefois, une méthode est proposée pour y arriver (Mutel *et al.* 2011). Cette jonction requiert cependant que la caractérisation spatiale soit propagée, en premier lieu, dans l'étape du calcul d'inventaire. Il existe aujourd'hui une méthode de calcul qui permet la propagation de ce type de caractérisation spatiale dans le cadre d'ACV. Cette méthode est décrite dans la sous-section 2.4.2.

[i] http://www.ecoinvent.ch/

Mode de caractérisation temporelle pour les flux élémentaires 1.0

La caractérisation temporelle en ACV a rarement été abordée. Il n'est donc pas surprenant de voir que seule la validité temporelle est disponible dans les BDDs. Cette validité est souvent référée à partir de l'année de création des définitions d'un processus. Il s'agit d'une information partielle inutile pour la modélisation des impacts environnementaux d'un système.

Une caractérisation temporelle des BDDs utile à la modélisation des impacts environnementaux est difficile à réaliser puisqu'il faut renseigner toutes les émissions sur le cycle de vie entier d'un processus. Une solution a été proposée par Heijungs et Suh (2002). Celle-ci s'apparente au mode de caractérisation des flux élémentaires 1.0. Les auteurs indiquent toutefois qu'il ne semble pas envisageable de décrire toutes les spécificités temporelles d'un système à cause de la quantité d'information à traiter. Il s'agit d'ailleurs d'un problème identifié et partiellement traité par certains chercheurs (Levasseur *et al.* 2010). La gestion de ce type d'information dans le calcul d'un ICV n'est cependant pas développée.

Un concept proposé par Levasseur *et al*. (2010) est pertinent pour la création d'ICV défini au niveau temporel. Il s'agit de la description des flux élémentaires sous forme de fonction de distribution (au sens de Schwartz). L'idée proposée est d'utiliser ces fonctions de distribution pour décrire les flux élémentaires pour différentes périodes.

Ce format de représentation est utile pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il permet d'obtenir une caractérisation temporelle des flux élémentaires, donc d'obtenir un ICV défini au niveau temporel sous un format utile à l'analyse. D'ailleurs les exemples proposés par Levasseur *et al*. (2010) indiquent que des résultats d'ACV renseignant le moment des émissions sous forme de fonction de distribution mènent à un niveau d'impact environnemental différent de l'analyse traditionnelle qui fait des hypothèses sur les flux. Cependant, ces exemples démontrent qu'il faut développer de nouvelles méthodes de modélisation des impacts environnementaux qui n'utilisent pas des facteurs d'impacts basés sur des hypothèses de flux constants. Il faudra donc discuter de la forme de caractérisation temporelle qui pourra être utile face à ce nouveau genre de facteurs d'impacts. Par ailleurs il faut noter que la publication de Levasseur *et al*. (2010) n'explique pas, comment définir ces fonctions de distributions pour des systèmes complexes constitués d'une multitude de processus. La gestion de cette information lors du calcul d'un ICV n'est pas décrite non plus.

Ainsi, la combinaison du principe de liens entre les caractéristiques temporelles et les flux élémentaires proposée par Heijungs et Suh (2002) avec le format des distributions temporelles proposé par Levasseur *et al*. (2010) constitue le mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires que nous notons 1.0.

2.4.2 Calcul d'un inventaire cycle de vie

Jolliet *et al*. (2010) (p.46) font une remarque intéressante sur l'agrégation qui est un aspect à considérer pour l'étape du calcul d'ICV et pour la considération des spécificités spatiotemporelles dans ce calcul :

« Pour réduire le travail à effectuer, une agrégation est généralement nécessaire. La première étape de cette agrégation se fait souvent implicitement lors de l'inventaire en additionnant toutes les émissions de la même substance. Cette agrégation se base sur le principe que l'impact d'une substance est lié aux propriétés intrinsèques de celle-ci et à son émission totale, plutôt qu'aux modes d'émissions, ce qui est clairement une simplification. En effet, le fait qu'une substance soit émise en différents lieux entraîne des différences de devenir des polluants (par exemple dues à des différences de climat ou de sol), d'exposition de la population (proximité d'une zone peuplée ou non) et de toxicité (écosystème sensible). Si ces facteurs sont déterminants, la quantité totale, mais également le lieu ou le mode d'émission doivent être explicités lors de la seconde agrégation, effectuée par la suite dans l'analyse de l'impact environnemental. Relevons que l'objectif de l'agrégation est de rendre les différentes émissions comparables et qu'il est possible et souvent intéressant de distinguer les contributions de chaque source d'émission au niveau de l'interprétation. »

Les caractéristiques spatiales spécifiques aux deux modes présentés à la sous-section 2.4.1 ont été choisies puisqu'elles offrent une désagrégation pertinente pour la phase de modélisation des impacts environnementaux. Il faut donc que ces caractéristiques spatiales des flux soient propagées à travers l'étape du calcul d'ICV.

La propagation des caractéristiques spatiales définies par ces deux modes se fait selon deux méthodes différentes. Il faut toutefois revenir à la description générale du calcul de l'ICV pour comprendre comment cette propagation est faite. En d'autres mots, il faut comprendre comment l'information servant à modéliser le système (flux et caractéristiques spatiales) est transcrite dans les termes de l'équation permettant de calculer l'ICV. L'ouvrage de Heijungs et Suh (2002) décrit en détail les particularités du calcul d'ICV. Les descriptions qui suivent se basent sur les propositions de cet ouvrage.

Description des termes de l'équation

Notation utilisée

La notation matricielle qui est utilisée dans ce manuscrit décrit les matrices par des lettres majuscules en gras (ex. : $\mathbf{T}$). Des lettres minuscules en italique avec une flèche ($\vec{v}$) sont utilisées pour décrire les vecteurs colonnes. Les lettres minuscules italiques (sans flèche) suivies de valeurs en indice seront utilisées pour décrire les éléments d'une matrice (ex. : $t_{j,k}$) ou d'un vecteur (ex. : r_k).

Définition générale des matrices et vecteurs

Les informations des processus décrivant l'activité humaine se retrouvent dans deux matrices distinctes. Il s'agit des matrices technologiques ($\mathbf{T}$) et d'échanges environnementaux ($\mathbf{E}$). La matrice technologique ($\mathbf{T}$) renseigne les flux de processus et la matrice d'échanges environnementaux ($\mathbf{E}$) renseigne les flux élémentaires. Tous les flux servant à modéliser un système sont nécessaires pour définir la matrice environnementale $\mathbf{E}$ et la matrice technologique $\mathbf{T}$. Le vecteur de référence $\vec{r}$ doit être défini par rapport aux valeurs des flux de processus nécessaires à l'accomplissement de la fonction liée à l'UF (flux de référence). Tous les flux qui servent à modéliser les systèmes sont liés par les définitions des processus. C'est justement pourquoi les processus peuvent être considérés comme les unités de base de la modélisation.

La réponse du calcul d'ICV est présentée dans le vecteur inventaire ($\vec{v}$) qui définit une liste des flux élémentaires liée à la réalisation du cycle de vie d'une fonction. Il s'agit des mêmes substances que celles qui définissent la matrice environnementale. Cependant, les flux sont différents puisqu'ils sont multipliés par un vecteur d'échelle correspondant aux quantités de processus agrégées sur tout le cycle de vie.

Matrice technologique

La matrice technologique $\mathbf{T}$ est fréquemment définie par la lettre **A** dans les publications du domaine de l'ACV (Heijungs and Suh 2002; Jolliet *et al*. 2010). Il existe deux modes pour la définir et donc deux modes pour l'insérer dans l'équation du calcul de l'ICV. Ces deux modes sont décrits afin de comprendre les différences observées dans la littérature.

Mode des produits

Le mode de l'ACV basé sur les produits requiert que la matrice $\mathbf{T_p}$ décrive les liens entre les produits des processus constituant le système modélisé. En fait, la matrice $\mathbf{T_p}$ est une fusion de vecteurs colonnes décrivant chacun des processus de l'activité humaine. Sous ce format, l'élément $t_{p_j,k}$ décrit la quantité du **produit** *j* nécessaire à l'accomplissement du **processus** *k*. Ce type de définition de la matrice technologique est lié à une étude ACV basée sur les produits.

Mode entrées-sorties

Le deuxième mode est lié à des études ACV de type entrées/sorties et requiert que la matrice **T** décrive les flux entre processus plutôt qu'entre produits et processus. Sous ce format, l'élément $t_{j,k}$ décrit la quantité de **processus** *j* nécessaire à l'accomplissement du **processus** *k*. Cette distinction dans la définition impose que le nombre de dimensions de l'espace linéaire décrit par cette structure soit équivalent au nombre de processus décrivant l'activité humaine (système). La matrice $\mathbf{T}$ devient alors nécessairement carrée et possède une diagonale nulle. En effet, les valeurs de $t_{j,k}$ lorsque $j = k$ décrivent le flux de processus nécessaire à sa propre réalisation. Pour ce deuxième mode de définition, ces valeurs doivent être égales à 0 pour bien identifier qu'un processus ne peut s'appeler lui-même s'il est caractérisé au niveau spatiotemporel.

C'est ce mode de définition de la matrice technologique qui est retenue dans les chapitres suivants du manuscrit pour des raisons qui deviendront évidentes lors du développement d'une nouvelle méthode de calcul au chapitre 5.

Matrice d'échanges environnementaux

La matrice d'échanges environnementaux ($\mathbf{E}$) définit, quant à elle, les extractions et émissions (flux élémentaires) des différents processus de l'activité humaine. Elle se nomme aussi matrice d'intervention et est souvent décrite par la lettre $\mathbf{B}$ dans les publications du domaine de l'ACV. L'élément e_{ij} décrit donc l'extraction ou l'émission d'une substance *i* par le processus *j*. Cette définition indique qu'il existe un lien entre les structures des matrices $\mathbf{T}$ et $\mathbf{E}$. Il faut en effet s'assurer que l'information des colonnes de la matrice $\mathbf{E}$ correspond aux lignes de la matrice $\mathbf{T}$. En d'autres mots, les flux élémentaires du processus *j* doivent se retrouver dans la colonne *j* de la matrice $\mathbf{E}$.

Vecteur de référence

Le vecteur de référence ($\vec{r}$) définit les quantités de processus qui sont nécessaires pour l'accomplissement de la fonction du scénario dont on veut évaluer l'ICV (défini aussi par l'UF). Ici encore, la structure du vecteur doit être conforme à la structure choisie pour les matrices **T** et **E**. En effet, le processus k lié à une ligne dans $\vec{r}$ doit référer au processus de la colonne *k* de la matrice **T**.

Vecteur d'inventaire

Le vecteur d'ICV ($\vec{v}$), qui est le résultat du calcul, décrit les quantités de substances extraites et émises (flux élémentaires) du cycle de vie d'un scénario.

Equation standard pour le calcul d'ICV

Puisqu'il existe deux modes de définition de la matrice **T**, il existe aussi deux équations pour décrire le calcul de l'inventaire. Les deux équations permettant d'obtenir un ICV ($\vec{v}$) sont décrites successivement pour simplifier la comparaison. C'est le vecteur de mise à l'échelle ($\vec{s}$) qui varie entre les équations 2.1 et 2.2. Les démonstrations qui expliquent la construction de ces équations sont présentées à l'annexe 6.

Equation pour le mode des produits :

$$\vec{v} = \mathbf{E} \cdot \vec{s} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{T}^{-1} \cdot \vec{r} \qquad \text{équation 2.1}$$

Equation pour le mode entrées-sorties :

$$\vec{v} = \mathbf{E} \cdot \vec{s} = \mathbf{E} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{T})^{-1} \cdot \vec{r} \qquad \text{équation 2.2}$$

Les deux équations présentées ci-dessus doivent permettre d'obtenir des résultats d'ICV équivalents, mais il existe moins de restrictions pour la définition de la matrice technologique (**T**) avec le premier mode.

Hypothèses implicites des équations pour le calcul d'ICV

Notons tout d'abord que l'équation 2.1 et l'équation 2.2 font une hypothèse implicite de linéarisation du système. C'est pourquoi tous les flux de l'activité humaine peuvent être décrits par une valeur numérique. Il s'agit en fait d'une simplification permettant de faire une modélisation des flux d'un système très complexe.

Tous les éléments de ces vecteurs et matrices doivent représenter des flux physiques dans l'ACV donc ce sont des mesures. Il faut aussi que les éléments de la matrice (**I-T**) de l'équation 2.2 respectent des conditions supplémentaires afin qu'il soit possible d'obtenir l'inverse de celle-ci. L'ouvrage d'Heijungs et Suh (2002) et une publication des mêmes auteurs (Suh and Heijungs 2007) décrivent les conditions qui doivent être respectées pour ce calcul d'ICV. Les conditions à respecter pour la matrice (**I-T**) sont :

- La diagonale doit être égale à 1 ($t_{jj} = 0$)
- Toutes les valeurs de T doivent être positives ($t_{jk} \geq 0$)
- La somme des valeurs d'une colonne doit être inférieure à 1 (La norme de **T** est inférieur à 1)

Propagation de la caractérisation spatiale lors du calcul d'inventaire

La description des matrices, vecteurs et des équations présentées précédemment permet maintenant d'expliquer comment propager la caractérisation spatiale qui décrit le système modélisé. Il existe une méthode standard qui est expliquée à la section 9.2 du livre de Heijungs et Suh (2002). Une nouvelle méthode a aussi été proposée pour faire la propagation des caractéristiques spatiales définies à partir du nouveau mode de caractérisation spatiale de Mutel et Hellweg (voir p.2-21).

Méthode de propagation standard

La division des flux élémentaires dans la matrice environnementale (**E**) se fait tout d'abord en fonction d'une division des substances. Il est ensuite possible de différencier les flux élémentaires en fonction des compartiments et sous-compartiments en incluant deux autres niveaux de division. Le nombre de lignes de la matrice **E** devient alors équivalent à la multiplication du nombre de flux élémentaire fois le nombre de combinaison compartiments et sous compartiments (13, voir tableau 2-3). L'équation 2.2 décrit bien que cette division se répercute sur la dimension de l'ICV ($\vec{v}$). C'est donc la structure des matrices et vecteurs qui propagent la caractérisation spatiale selon les compartiments et sous-compartiments avec cette méthode standard de calcul. Le même principe peut s'appliquer à la propagation de la caractérisation temporelle si les flux sont divisés par période au lieu de compartiments.

Méthode de propagation de Mutel et Hellweg

Mutel et Hellweg (2009) proposent, quant à eux, une modification à la méthode de calcul afin de permettre l'utilisation de facteurs d'impacts considérant la variabilité spatiale de scénarios. Cette méthode propose un nouveau type de propagation de la caractérisation spatiale des processus à travers l'étape du calcul d'ICV. Il faut cependant souligner que cette nouvelle méthode propose une fusion de l'étape du calcul d'ICV et de l'étape de la modélisation des impacts. Il n'est donc strictement pas possible d'utiliser cette méthode de calcul pour obtenir des ICVs définis au niveau spatial.

Le principe de base de cette méthode proposée par Mutel et Hellweg est d'utiliser la structure spécifique des matrices environnementale (**E**) et technologique (**T**) décrivant un système analysé afin que la caractérisation spatiale de ce système puisse être propagée dans l'étape fusionnée du calcul d'ICV et de modélisation des impacts. Le principe exposé ici d'applique aux deux modes de définition de la matrice technologique proposée précédemment. Il faut cependant noter que la méthode de calcul présentée par Mutel et Hellweg utilise seulement le deuxième mode « entrées- sorties » de définition de la matrice technologique. C'est l'utilisation de la structure de **T** pour la caractérisation spatiale qui différencie cette méthode de la précédente. Cette utilisation de la structure pour la description spatiale est rendue possible par le lien qui est fait entre un processus et sa caractérisation spatiale.

Pour bien comprendre cette possibilité, il faut revenir sur la définition des matrices environnementale et technologique donnée à la page 2-23. Dans la matrice technologique (**T**), chaque ligne représente un processus différent qui peut être nécessaire pour la réalisation des processus des différentes colonnes. Chaque ligne de la matrice technologique (**T**) est alors représentative d'une réalité spatiale différente puisque chaque processus est lié à une caractérisation spatiale spécifique. Cette caractérisation spatiale est ensuite simplement propagée à l'information sur les flux élémentaires de la matrice environnementale (**E**) puisque chaque colonne de cette matrice présente les flux élémentaires d'un processus correspondant à ceux de la matrice technologique (**T**). Il est donc ensuite possible de multiplier les flux élémentaires d'une colonne de la matrice environnementale (**E**) (qui correspond à un site spécifique) par des FCs reliés à ce site et faire l'addition des impacts environnementaux qui considèrent déjà la variabilité spatiale des flux élémentaires.

L'information spatiale est tout de même perdue quand vient le temps de calculer l'inventaire puisque l'on fait l'agrégation entre les flux élémentaires de différents sites, mais l'effet de la spatialité des flux élémentaires est considéré dans la modélisation des impacts environnementaux.

Description mathématique de la méthode de calcul de Mutel et Hellweg

Pour commencer, il faut revenir à l'équation 2.2 qui décrit le deuxième mode de calcul d'un ICV :

$$\vec{v} = \mathbf{E} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{T})^{-1} \cdot \vec{r} \qquad \text{équation 2.2}$$

Cette équation permet de faire l'addition de tous les flux élémentaires pour tous les processus nécessaires à la chaîne de production du besoin défini dans le vecteur $\vec{r}$. Une agrégation des flux élémentaires de tous les sites d'un système découle de l'équation 2.2. Pour obtenir des flux élémentaires spatialement différentiés, il ne faut donc pas faire cette addition. L'idée proposée par Mutel et Hellweg (2009) est de transformer la matrice environnementale $\mathbf{E}$ en matrice d'impact pour que l'addition se fasse plutôt sur des impacts environnementaux qui considèrent déjà la variabilité spatiale. L'équation 2.3 décrit comment le calcul est modifié pour que la matrice environnementale devienne une matrice d'impacts environnementaux qui considère la variabilité spatiale.

$$\vec{w} = \mathbf{D} \circ \mathbf{E} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{T})^{-1} \cdot \vec{r} \qquad \text{équation 2.3}$$

Où :
$\mathbf{D}$ est la matrice des facteurs d'impacts définie en fonction des sites des processus unitaires de la matrice technologique $\mathbf{T}$. Chaque colonne de la matrice $\mathbf{D}$ répertorie les facteurs de caractérisation pour tous les types de flux élémentaires de la région spécifiquement reliée au processus technologique de la ligne correspondante de la matrice technologique $\mathbf{T}$.
$\circ$ est le symbole pour le produit d'Hadamard qui est en fait le produit terme à terme des valeurs des matrices $\mathbf{D}$ et $\mathbf{E}$ qui sont multipliées

Les valeurs présentées dans le vecteur $\vec{w}$ sont donc les valeurs d'impacts environnementaux qui considèrent la variabilité spatiale du scénario modélisé à partir des informations d'une BDD.

Description schématique de la propagation de la caractérisation spatiale

La figure 2.4 décrit la propagation de la caractérisation spatiale à l'aide d'un schéma qui décrit l'équation 2.3. La figure décrit la direction de la propagation de la caractérisation spatiale des processus qui trouve sa source dans une BDD pour ACV afin de finalement structurer la matrice de facteur de caractérisation ($\mathbf{D}$) correspondant aux régions reliées à ces processus unitaires.

Pour simplifier la représentation matricielle dans le schéma, $\mathbf{Z}$ est posé comme égal à la matrice $(\mathbf{I}\text{-}\mathbf{T})^{-1}$. La propagation de la caractérisation spatiale se fait donc en 3 étapes :

1. Une ligne de la matrice $\mathbf{Z}$ représente les flux de processus nécessaires à l'accomplissement d'un processus lié à une région spécifique *j*.
2. Les flux élémentaires reliés au processus *j*, donc spécifiques à la région *j*, sont définis dans la colonne *j* de la matrice $\mathbf{E}$.
3. Les facteurs de caractérisation des impacts environnementaux pour une région *j* sur tous les types de flux élémentaires sont définis dans la colonne *j* de la matrice $\mathbf{D}$.

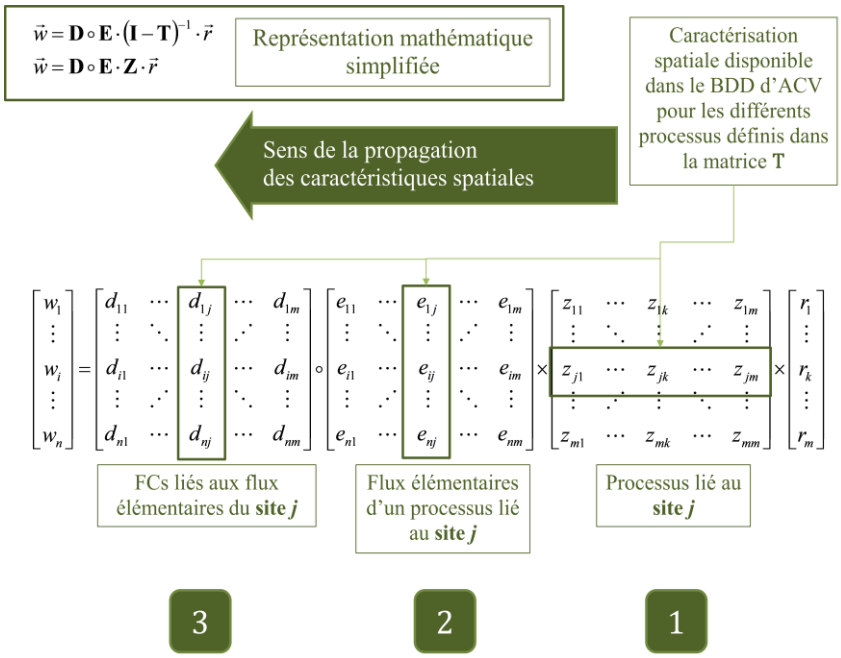


Figure 2.4 : Description visuelle de la propagation de la caractérisation spatiale des processus unitaires lors du calcul des impacts environnementaux à partir de la méthode proposée par Mutel et Hellweg (2009)

Cette méthode requiert une création automatisée de la structure de la matrice **D** afin qu'elle se définisse en fonction des processus spécifiques à l'étude. Cette construction automatique peut être faite au sein de la méthode de modélisation des impacts environnementaux proposée par Mutel et Hellweg (2011) mais il serait aussi intéressant d'obtenir un ICV caractérisé au niveau spatial.

Précision de la caractérisation spatiale

Une plus grande précision n'augmente pas nécessairement le temps de calcul. En effet, la quantité d'information à gérer lors du calcul d'ICV ne dépend pas directement de la précision des caractéristiques spatiales, mais de la quantité de régions différenciées. Donc, une situation géographique très précise par exemple une coordonnée GPS ne prend pas plus d'espace dans la structure matricielle du calcul d'ICV qu'une situation géographique imprécise comme un continent. Le format de l'information spatiale n'est pas non plus un problème pour l'étape du calcul d'inventaire puisque c'est la structure matricielle qui informe sur l'aspect spatial.

Une caractérisation spatiotemporelle très précise diminue la généricité des processus définis dans une BDD et augmente la taille de ces BDDs.

2.4.3 Forces et faiblesses identifiées pour la deuxième phase de la méthode ACV

L'analyse détaillée de la deuxième phase de la méthode ACV permet d'identifier plusieurs faiblesses méthodologiques et une force dans le choix des modes de caractérisation :

Il existe deux modes de caractérisation spatiale pour la description des flux définis dans les BDDs actuelles

Il existe un mode de caractérisation temporelle pour la description des flux définis dans les BDDs actuelles

Il n'y a pas d'analyse de la pertinence des modes de caractérisation spatiale et temporelle existants face à l'efficacité de leur mise en œuvre

L'utilisation de distributions temporelles pour caractériser les flux élémentaires au niveau temporel n'est pas expliquée pour les étapes de modélisation de système et du calcul d'ICV

La caractérisation spatiale actuelle des flux élémentaires peut être propagée lors du calcul d'ICV peu importe le niveau de précision de cette caractérisation

2.5 Phase 3 : Modélisation des impacts environnementaux

La section 2.5 décrit comment les méthodes de modélisation des impacts environnementaux sont construites. Cette description permet d'identifier comment il faut caractériser les résultats de l'ICV au niveau spatiotemporel afin que ces mêmes caractéristiques soient utiles à la modélisation des impacts environnementaux.

2.5.1 Considérations spatiotemporelles générales pour la modélisation des impacts

Le principe de base utilisé en ACV est une modélisation linéaire des systèmes qui se traduit lors de l'étape de modélisation des impacts par une multiplication simple des flux élémentaires par des facteurs de caractérisation (FCs) spécifiques. La correspondance se fait, à minima, en fonction du type de substance et de la catégorie d'impact qui est choisie. Une méthode modélisant le potentiel de réchauffement climatique possède des FCs correspondant, par exemple, aux flux élémentaires de CO_2, de N_2O, de Méthane, de SF_6 et de plusieurs autres substances. Le type de substance modélisé au niveau de ses impacts n'est cependant pas le seul paramètre définissant les FCs. Les différences de devenir, d'exposition à la population et de capacité d'absorption de l'environnement doivent aussi être considérées pour la définition des FCs. Ces trois exemples de paramètres varient en fonction des spécificités spatiotemporelles et c'est pourquoi il peut être important de considérer ces spécificités. Il devient alors pertinent d'établir des correspondances en fonction des régions ou des périodes de flux élémentaires.

A la page 21 de la norme ISO 14 044, il est dit que :

« En fonction du mécanisme environnemental et des objectifs et du champ de l'étude, il convient de considérer la variabilité spatiale et temporelle du modèle de caractérisation qui rattache les résultats de l'inventaire à l'indicateur de catégories. Il convient que le devenir ultime et le transport des substances soient intégrés au modèle de caractérisation. »

Il est aussi suggéré à la page 22 de la même norme d'améliorer la pertinence environnementale d'un indicateur en considérant *« les aspects spatiaux tels que la surface et l'échelle»* ainsi que *« les aspects temporels tels que la durée, le temps de séjour, la persistance, le moment»*.

Il faut ajouter à ces informations environnementales que :

« Le nombre et le genre des hypothèses de simplification et des choix de valeurs utilisés dans le modèle de caractérisation pour l'indicateur de catégories varient également selon les catégories d'impact et peuvent dépendre de la zone géographique. »

Les normes ISO 14 040 et 14 044 définissant la méthode ACV indiquent donc qu'il faut considérer les spécificités spatiotemporelles, mais à la page 17 de la norme ISO 14 040, il est dit que :

« Le manque de dimensions spatiales et temporelles dans les résultats d'ICV introduit de l'incertitude dans les résultats de l'ACVI[i]. L'incertitude varie selon des caractéristiques spatiales et temporelles de chaque catégorie d'impact. »

En effet, les compartiments et sous-compartiments ne renseignent pas sur toutes les particularités de l'environnement qui ont un effet sur la définition des FCs.

[i] ACVI = évaluation de l'impact du cycle de vie

Ces commentaires et plusieurs publications présentés à la section 2.2 indiquent que tous s'accordent sur la variabilité spatiale et temporelle des réponses de l'environnement face à différents flux élémentaires. L'importance de la variabilité des réponses sous une perspective holistique et les moyens pour considérer cette variabilité laisse cependant place au débat. C'est surtout la faisabilité d'une considération d'un haut niveau de détail qui laisse certains chercheurs sceptiques. Pour eux, il faut trouver le juste niveau de précision pour ne pas handicaper la méthode par une quantité de travail trop importante lors de la modélisation des systèmes. Il faut aussi ne pas négliger le travail supplémentaire pour définir les paramètres d'une méthode de modélisation des impacts environnementaux.

A ces conditions s'ajoute celle des normes ISO (14 040 et 14 044) qui indiquent que les méthodes de modélisation doivent avoir la capacité de représenter les mécanismes environnementaux en fonction de bases scientifiques.

2.5.2 Modélisation d'impacts environnementaux à partir de l'ICV

La norme ISO 14 044 résume le calcul des résultats d'indicateurs comme suit :

« Le calcul des résultats d'indicateurs implique de convertir les résultats de l'ICV en unités communes et d'agréger les résultats convertis au sein de la même catégorie d'impact. Cette conversion utilise des facteurs de caractérisation(FC). Le résultat du calcul est un indicateur numérique. »

Pour obtenir ces impacts, il faut utiliser le calcul suivant :

$$\vec{w} = \mathbf{F} \cdot \vec{v} = \mathbf{F} \cdot [\mathbf{E} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{T})^{-1} \cdot \vec{r}] \qquad \text{équation 2.4}$$

Où :
$\vec{w}$ est le vecteur d'impacts environnementaux
$\mathbf{F}$ est la matrice des FCs où chaque ligne correspond à une catégorie d'impact et les FCs d'une colonne modélisent l'impact d'une substance pour différentes catégories.

La considération de la variabilité des effets pour des réalités spatiales et temporelles différentes peut se faire en fonction du choix de FC utilisé. La connexion entre ces FCs spécifiques au niveau spatiotemporel peut se faire si l'ICV ($\vec{v}$) est divisé, non seulement au niveau des substances, mais aussi au niveau des différentes régions et différentes périodes (voir p.2-26).

Il faut donc que les caractéristiques spatiales et temporelles décrivant l'ICV permettent d'identifier le FC le plus représentatif. En d'autres mots, la matrice $\mathbf{F}$ doit se définir en fonction des régions et périodes divisant la structure de l'ICV ou vice-versa. Il devient alors intéressant de comprendre comment les FCs sont calculés pour comprendre le type d'information spatiale et temporelle permettant l'utilisation de FCs représentatif.

2.5.3 Définition des facteurs de caractérisation d'impacts

Les FCs traduisent l'effet des flux élémentaires sur l'environnement en fonction de différentes catégories d'impacts. Leurs évaluations proviennent d'une modélisation de leurs effets sur différents récepteurs en fonction de mécanismes environnementaux. Les FCs sont calculés différemment en fonction des catégories d'impacts puisque les mécanismes environnementaux qui entrent en jeux varient en fonction de ces catégories.

En plus des paramètres déjà identifiés dans la sous-section 2.2.2, Finnveden *et al.* (2009) donnent une liste de quatre aspects à considérer lorsque l'on modélise les impacts environnementaux provenant de l'émission des substances.

Ces aspects importants sont : la quantité de substances émises, la propriété de ces substances, la caractérisation des sources d'émission et l'état de l'environnement qui reçoit ces émissions. Les deux derniers aspects de cette liste ne sont pas spatialement et temporellement représentatifs dans les facteurs standards d'impacts utilisés aujourd'hui par la plupart des méthodes de modélisation des impacts environnementaux. En effet, ces aspects sont modélisés à partir de modèles globaux de sources d'émission et d'environnement d'accueil des émissions. Il s'agit d'un problème pour certaines catégories d'impacts où ces aspects varient de manière importante pour différents sites à différents moments.

Méthodes générales du calcul des FCs

Les FCs doivent représenter les mécanismes environnementaux en faisant une traduction de l'effet de différentes substances sur différentes catégories d'impacts. Deux exemples de calcul de FCs pour différentes catégories sont présentés pour bien comprendre comment cette traduction est calculée.

FC du changement climatique

L'effet de différents gaz à effet de serre se traduit à partir de l'équation suivante :

$$FC_i = \frac{\int_0^\tau a_i \cdot C_i(t)dt}{\int_0^\tau a_{CO_2} \cdot C_{CO_2}(t)dt} \qquad \text{équation 2.5}$$

Où :
FC_i est le FC de la substance *i* qui décrit le potentiel de changement climatique en équivalent de l'effet de 1 kg CO_2 par kg de la substance *i*.
a_i est l'absorption de la radiation thermique (forçage radiatif instantané) suite à une augmentation d'une unité de concentration du gaz *i*.
$C_i(t)$ est la concentration du gaz *i* restant au temps *t* après son émission
τ est le nombre d'années pour lesquelles l'intégration a été effectuée (horizon de temps)

L'équation 2.5 démontre que les FCs du changement climatique dépendent du temps. Il serait donc pertinent que les flux qui sont traduits par ces FC correspondent à l'horizon temporel utilisé pour le calcul des FCs des *i* substances.

Cette catégorie d'impact est considérée comme globale puisque le temps de résidence (persistance) des gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre est une portion importante des horizons de temps utilisés dans les différentes méthodes (20, 100 ou 500 ans pour les méthodes de l'IPCC) et que les $C_i(t)$ sont donc considéré comme invariables selon la localisation des émissions.

FC toxicologique

Plusieurs méthodes calcul des FC pour l'effet de flux élémentaires sur la santé humaine. Le calcul utilisé pour ces FC peut être défini par les équations suivantes (Pennington *et al*. 2006) :

$$FC_i = FS_i \cdot FX_i \cdot FR_i \cdot FN_i \qquad \text{équation 2.6}$$

Où :
FS_i est le facteur de sort de la substance *i* dans l'environnement
FX_i est le facteur d'exposition de l'humain face à la substance *i*
FR_i est le facteur de réponse de l'humain face à la substance *i*
FN_i est le facteur de sévérité sur l'humain face à la réponse à la substance *i*

Ces paramètres peuvent donc se combinés pour simplifier l'équation 2.6 qui devient :

$$FC_i = FI_i \cdot FE_i \qquad \text{équation 2.7}$$

Où :
FI_i est le facteur de fraction prise de la substance i par un humain (où $FI_i = FS_i \cdot FX_i$)
FE_i est le facteur d'effet de la substance i sur un humain (où $FE_i = FR_i \cdot FN_i$)

Il faut savoir que les deux termes de l'équation 2.6 dépendent de plusieurs paramètres dont la période et le site d'émissions de la substance. Le choix d'un FC représentatif sera donc plus simple s'il y a correspondance entre les caractéristiques spatiotemporelles du flux élémentaire et la période et le site utilisé pour définir le FC. Il reste cependant à déterminer comment ce lien est établi.

La structure pour définir les FCs permet de calculer des FCs spécifiques pour chaque région et période qui semblent pertinente (Rosenbaum et al. 2007).

2.5.4 Forces et faiblesses identifiées pour la troisième phase de la méthode ACV

Il existe peu de discussions sur le type, format et la précision utile pour la caractérisation spatiotemporelle des ICVs en fonction des besoins pour la modélisation des impacts environnementaux

2.6 Résumé du chapitre

La description de la méthode ACV proposée dans ce chapitre permet de mieux comprendre le niveau de développement de la considération des spécificités spatiotemporelles lors d'une modélisation ACV. L'analyse de ces développements permet ainsi de définir une liste de forces et de faiblesses au niveau de la considération des spécificités spatiotemporelles.

La description générale de la méthode ACV de la section 2.1 permet d'identifier une première force méthodologique dans la définition de principes qui identifient le niveau de considération des spécificités spatiotemporelles attendues.

La description de l'historique de développement de la méthode ACV de la section 2.2 indique clairement, par plusieurs exemples d'études, que la question des considérations spatiales est plus avancée que celle des considérations temporelles. Plusieurs publications démontrent l'intérêt de considérer les spécificités spatiotemporelles aussi bien au niveau de la modélisation des systèmes que celle des impacts environnementaux. Les publications soulignent une avancée sur la proposition de méthodes de modélisation des impacts environnementaux qui considèrent les spécificités spatiotemporelles de l'environnement. Il s'agit d'ailleurs du seul domaine qui soit vraiment traité en détail au niveau de la considération des spécificités spatiotemporelles sur la méthode ACV. En effet, le niveau de caractérisation spatiotemporelle des BDDs actuelles ne correspond pas au besoin des méthodes de modélisation des impacts environnementaux. L'analyse des publications sur la considération temporelle a aussi permis d'identifier des disparités dans l'utilisation du terme dynamique pour définir des études ACV.

L'analyse de l'historique des développements sur des considérations spatiales et temporelles est très utile pour poser les bases de l'état de l'art, mais une description plus détaillée de la méthode est aussi présenté pour mieux comprendre les spécificités des forces et faiblesses. C'est dans les sections 2.3 à 2.5 que cette description détaillée est faite. Les faiblesses identifiées pour la considération des spécificités spatiales et temporelles dans la mise en œuvre des études ACV actuelles sont les suivantes :

- Il n'y a pas d'analyse de la pertinence des modes de caractérisation spatiale existants. Il est donc difficile de faire un choix avisé sur ce sujet (sous-section 2.4.1)
- Aucun mode de caractérisation temporelle n'est proposé pour la description de système à partir des sources d'information typiquement utilisées dans les études ACV (sous-section 2.4.1)
- La propagation lors du calcul d'ICV d'une caractérisation temporelle sous forme de distribution n'est pas décrite aujourd'hui. Il faut donc évaluer si les méthodes existantes pour la propagation des caractéristiques spatiales peuvent être transposées (sous-section 2.4.2)
- Il n'y a que très peu d'analyses sur le type, le format et la précision des descriptions spatiotemporelles nécessaires à la modélisation des impacts environnementaux avec les méthodes de modélisation qui considèrent ces aspects (section 2.5)

Cette liste de forces et faiblesses touche plusieurs étapes et phases de la méthode ACV qui sont toutes interconnectées. Une analyse de ces forces et faiblesses et des liens qui les unissent est donc une étape judicieuse avant de proposer une structure de travail pour le développement des considérations spatiotemporelles dans la méthode ACV. Le chapitre 3 présente cette analyse et ainsi qu'un plan de travail pour proposer de nouveaux développements.

3 DEMARCHE POUR LE DEVELOPPEMENT

Le chapitre 2 a permis de dresser une liste de forces et faiblesses méthodologiques pour la considération des spécificités spatiotemporelles dans la méthode ACV. Cette liste a été construite à partir d'une description générale de la méthode ACV, de l'historique des développements encadrant les considérations spatiotemporelles depuis plus de 15 ans et par une description détaillée de certains aspects liés aux différentes phases.

L'objectif du chapitre 3 est d'organiser le travail pour proposer des développements qui amélioreront la capacité de considération des spécificités spatiotemporelles de la méthode ACV.

La section 3.1 commence l'organisation de la démarche par l'analyse des forces et faiblesses méthodologiques pour la considération des spécificités spatiotemporelles. Cette analyse divise la discussion entre les considérations spatiales et temporelles afin de clarifier la discussion. Toutes les forces et faiblesses méthodologiques identifiées sont décrites en fonction de leur position dans la structure de la méthode ACV. Ce positionnement permet une description des associations à faire entre ces forces et faiblesses et alimente la discussion qui décrit la recherche des freins méthodologiques les plus importants actuellement.

La section 3.2 règle immédiatement une question de vocabulaire qui a été identifiée comme pénalisante dans le chapitre 2. Il s'agit de clarifier l'utilisation du terme dynamique pour décrire des études ACV qui ont été publiées dans les dernières années. La résolution rapide de cette ambiguïté est nécessaire pour la clarification des discussions suivantes. Il s'avère qu'il est opportun de distinguer les termes modélisation dynamique des systèmes et modélisation dynamique des impacts environnementaux.

La section 3.3 reprend les conclusions de la discussion sur la recherche des freins méthodologiques les plus importants pour définir une liste de propositions de développements qui devrait débloquer ceux-ci. Les propositions sont présentées, dans un premier temps, en séparant celles qui touchent les considérations spatiales et de celles qui touchent les considérations temporelles pour suivre le format d'analyse des forces et faiblesses. La corrélation observée entre les propositions de développements de considérations spatiales et temporelles guide toutefois à une combinaison de plusieurs de ces propositions pour créer une liste de neuf propositions finales.

La section 3.4 vient ensuite structurer le travail en fonction de ces neuf propositions. Il faut, en effet, respecter un certain ordre dans le traitement de chacune de ces propositions à cause des liens qui les unissent. L'identification et l'analyse de ces liens nécessitent une description détaillée de la structure de la deuxième phase de la méthode ACV et des facettes qui sont liées à cette phase. L'organisation des propositions permet aussi de définir des objectifs et sous-objectifs spécifiques qui résument le travail à accomplir pour donner vie à ces propositions.

Finalement, la section 3.5 présente les différents objectifs spécifiques et comment ceux-ci seront traités dans le reste du document. Il s'agit, en fait, du plan de travail pour les chapitres suivants. Cette dernière section présente donc l'organisation du travail exploratoire effectué dans cette thèse.

3.1 Forces et faiblesses des considérations spatiotemporelles

Cette section fait un retour sur le positionnement des forces et faiblesses de mise en œuvre des considérations spatiotemporelles dans la structure de la méthode ACV. Il s'agit d'une analyse des conclusions du chapitre 2 qui sert de fondement aux définitions des propositions de développements présentées à la section 3.3.

3.1.1 Description des forces et faiblesses

Comme indiqué à la section 2.2, les discussions sur le développement de la méthode ACV dissocient typiquement la considération des spécificités spatiales de celles qui sont temporelles. La description du positionnement des forces et faiblesses conserve cette division pour simplifier les références aux observations du chapitre 2.

Forces et faiblesses méthodologiques pour la considération des spécificités spatiales

Le tableau 3-1 présente une liste des forces et faiblesses méthodologiques pour la considération des spécificités spatiales qui ont été identifiées dans le chapitre 2.

Tableau 3-1 : Panorama des forces et faiblesses méthodologiques identifiées pour la considération des spécificités spatiales dans la méthode ACV. Les forces sont en vert et les *faiblesses* en *rouge* et *italique*.

Indice	Liste	Liens vers le chapitre 2
	Général	
SG-1	Existence de principes dans la méthode ACV pour identifier le niveau attendu de considération des spécificités spatiales lors de la modélisation du système et des impacts environnementaux	Section 2.1
SG-2	Démonstration de l'importance de considérer les spécificités spatiales pour la modélisation des systèmes et de certaines catégories d'impacts environnementaux	Sous-section 2.2.2
	Phase 2 : Modélisation du système et calcul d'ICV	
SP2-1	*Désaccord partiel entre la caractérisation spatiale disponible dans les BDDs actuelles et les besoins des méthodes de modélisation des impacts environnementaux considérant une variabilité spatiale des effets des flux élémentaires*	Sous-section 2.2.2
SP2-2	Existence de deux modes de caractérisation spatiale pour la description des flux définis dans les BDDs actuelles	Sous-section 2.4.1
SP2-3	*Absence d'analyse de la pertinence des modes de caractérisation spatiale existants face à l'efficacité de mise en œuvre*	Sous-section 2.4.1
SP2-4	Possibilité de propager la caractérisation spatiale actuelle des flux élémentaires lors du calcul d'ICV peu importe la précision de la caractérisation	Sous-section 2.4.2
	Phase 3 : Modélisation des impacts environnementaux	
SP3-1	*Discussion déficiente sur la correspondance entre la caractérisation spatiale des ICV et les besoins d'information de la modélisation des impacts environnementaux*	Sous-section 2.5.1
SP3-2	Existence de quelques méthodes de modélisation des impacts environnementaux qui considèrent les spécificités spatiales de l'environnement face à différents types de flux élémentaires	Sous-section 2.2.2

Forces et faiblesses méthodologiques pour la considération des spécificités temporelles

Le tableau 3-2 présente une liste des forces et faiblesses méthodologiques pour la considération des spécificités temporelles qui ont été identifiées dans le chapitre 2.

Tableau 3-2 : Panorama des forces et faiblesses méthodologiques identifiées pour la considération des spécificités temporelles dans la méthode ACV. Les forces sont en vert et les *faiblesses* en *rouge* et *italique*.

Indice	Liste	Liens vers le chapitre 2
	Général	
TG-1	Existence de principes dans la méthode ACV pour identifier le niveau attendu de considération des spécificités temporelles lors de la modélisation du système et des impacts environnementaux	Section 2.1
TG-2	*L'utilisation du terme dynamique est ambigüe à cause de son utilisation pour différents concepts*	Sous-section 0
TG-3	Démonstration de l'importance de considérer les spécificités temporelles pour la modélisation des systèmes et d'une catégorie d'impact environnemental	Sous-section 2.2.30
	Phase 2 : Modélisation du système et calcul d'ICV	
TP2-1	*Quasi inexistence d'une caractérisation temporelle des flux dans les BDDs empêchant une modélisation des impacts environnementaux qui soient représentative et faiblement variable*	Sous-section 2.2.30
TP2-2	Existence d'un mode de caractérisation temporelle pour la description des flux élémentaires définis dans les BDDs actuelles	Sous-section 2.4.1
TP2-3	*La pertinence du mode de caractérisation temporelle existant n'est que peu analysée face à l'efficacité de mise en œuvre*	Sous-section 2.4.1
TP2-4	*L'utilisation de distributions temporelles pour caractériser les flux élémentaires au niveau temporel n'est pas expliquée pour les étapes de modélisation de système et du calcul d'ICV*	Sous-section 2.4.2
	Phase 3 : Modélisation des impacts environnementaux	
TP3-1	*Discussion déficiente sur la correspondance entre la caractérisation temporelle des ICVs et les besoins d'information de la modélisation des impacts environnementaux*	Sous-section 2.5.1
TP3-2	Existence de quelques méthodes de modélisation des impacts environnementaux qui considèrent les spécificités temporelles de l'environnement face à différents types de flux élémentaires	Sous-section 2.2.2

3.1.2 Positionnement des forces et faiblesses dans la structure de la méthode ACV

Les forces et faiblesses présentées dans les tableaux 3-1 et 3-2 se lient à différentes phases de la méthode ACV. Le positionnement de ces forces et faiblesses indique que plusieurs faiblesses méthodologiques de considération des spécificités spatiotemporelles se retrouvent dans la deuxième phase.

3.1.3 Identification des freins critiques aux considérations spatiotemporelles

Forces de la méthode concernant la considération des spécificités spatiotemporelles

Il faut tout d'abord reconnaître que le nombre d'études ACV qui considèrent les spécificités spatiotemporelles des systèmes lors de la modélisation des impacts environnementaux est encore faible par rapport à la multitude de scénarios existants dans l'activité humaine. Pourtant, les règles des normes ISO 14 040 et 14 044 qui indiquent qu'une modélisation ACV doit être représentative au niveau spatiotemporel (forces SG-1 et TG-1) sont très claires. Ces règles soulignent, en effet, la nécessité de considérer les spécificités spatiotemporelles dès qu'elles peuvent avoir un effet sur les résultats et conclusions d'une étude ACV (voir Section 2.1).

De plus, les méthodes de modélisation d'impacts environnementaux qui considèrent la variabilité des effets de substances en fonction des spécificités spatiales de l'environnement se développent depuis une dizaine d'années (force SP3-2). Une méthode (Levasseur et al. 2010) plus récente permet maintenant de considérer la variabilité de l'impact des GES en fonction de l'horizon temporel considéré (force TP3-2).

La plupart des catégories d'impacts de ces méthodes de modélisation possèdent une dépendance spatiale ou temporelle non négligeable. Cette dépendance est clairement identifiable par le degré de variabilité des paramètres nécessaires au calcul des FCs en fonction de la situation spatiotemporelle des flux élémentaires. Plusieurs études ACV ont aussi démontré que leurs résultats varient de manière importante pour certaines catégories d'impacts environnementaux si les spécificités spatiales ou temporelles des systèmes et des effets sur l'environnement sont considérées (forces SG-2 et TG-3).

La reconnaissance de l'importance de la caractérisation spatiale a même guidé vers la proposition de deux modes de caractérisation spatiale et d'un mode de caractérisation temporelle (forces SP2-2 et TP2-2). Le mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires, s'apparentant au mode de caractérisation temporelle, permet d'obtenir un ICV caractérisé au niveau spatial (force et SP2-4).

Toutes les observations présentées et développements récents viennent renforcer la nécessité et la capacité à considérer les spécificités spatiotemporelles lors de la réalisation d'une étude ACV. Il devient alors difficile d'expliquer pourquoi la majorité des études ACV contemporaines ne considèrent pas encore les spécificités environnementales, au moins au niveau spatial, puisque la méthode ACV le demande, le permet et puisque les résultats d'études peuvent varier grandement en fonction de celles-ci.

Faiblesses qui diminuent la capacité de considérer les spécificités spatiotemporelles

Le fait que la définition (normes ISO 14 040 et 14 044) de la méthode ACV soit très peu descriptive des considérations spatiotemporelles dans la deuxième phase est un indice pour identifier les freins à la considération des spécificités spatiotemporelles dans les études ACV contemporaines.

Le problème général constitué de plusieurs freins est toutefois assez complexe et mérite d'être défini avec plus de détails. Une première analyse de la phase de modélisation des systèmes et du calcul d'ICV (2e phase) indique que la modélisation de systèmes désagrégés au niveau spatiotemporel requiert une quantité d'information très importante qui n'est pas encore tout à fait disponible (faiblesses *SP2-1* et *TP2-1*). Une trop grande quantité de données à traiter est considérée comme synonyme d'un coût financier très élevé lié à un temps de travail important qui diminue l'attrait de la méthode ACV pour l'évaluation de la durabilité environnementale d'un système. La méthode ACV est d'ailleurs déjà reconnue pour la grande quantité de données nécessaire à la modélisation (voir sous-section 2.1.2, page 2-5) et la solution actuelle à cet inconvénient a été la création de BDDs pour la modélisation ACV.

La création de BDDs pour la modélisation ACV a permis d'améliorer la profondeur et diminuer le temps de travail lié aux études ACV en offrant des descriptions de systèmes très complexes pour décrire une proportion importante d'un système lié à un scénario. L'utilisation de ces BDDs vient cependant avec un coût. En effet, les systèmes deviennent si complexes qu'il est de plus en plus ardu de les définir totalement pour qu'ils soient complètement représentatifs des scénarios d'une étude. La représentativité spatiotemporelle est justement touchée par ce problème comme le démontre l'exemple 2-3 (p. 2-18) et il est difficile d'en évaluer la gravité. En effet, le faible nombre d'études détaillées au niveau spatiotemporel ne permet pas de déterminer si les considérations spatiotemporelles doivent être faites sur la totalité d'un système ou sur quelques processus pour en arriver à une évaluation équitable[i] de la durabilité environnementale. Ce problème pourrait cependant être résolu par un apport d'information plus important.

Toutefois, l'apport d'informations supplémentaires est intéressant seulement si la gestion de cette information n'amène pas une hausse de travail si importante qu'il devient impossible de gérer les BDDs. La solution la plus simple pour minimiser les effets pervers liés à la gestion d'une grande quantité d'information est de définir un standard de description des informations (processus) constituant les BDDs. Un standard peut, en effet, servir à assurer l'interopérabilité entre différentes sources d'informations et permettre un certain niveau d'automatisation s'il est accepté par une majorité d'utilisateurs. Les modes de caractérisation spatiale et temporelle existants peuvent servir pour le standard de description, mais il n'existe aucune évaluation de la pertinence de ces modes pour évaluer l'efficacité de mise en œuvre[ii] (faiblesses *SP2-3* et *TP2-3*).

Les principes de Shonan (Sonnemann *et al*. 2011) s'attaquent à cette question du standard pour la description de BDDs utilisées dans les études ACV. La discussion sur la caractérisation spatiotemporelle reste cependant superficielle et il n'est pas possible d'y trouver des solutions aux faiblesses identifiées pour la modélisation des systèmes. Il n'y a d'ailleurs que peu de discussion sur les modes de caractérisation spatiale utilisés par différentes BDDs. Une discussion plus approfondie semble donc toujours d'actualité.

Il faut ensuite souligner que seulement une partie de la caractérisation spatiale des BDDs actuelles est utilisée pour définir la caractérisation spatiotemporelle des ICVs (voir section 2.4). Ce niveau de caractérisation est normalement insuffisant pour permettre l'utilisation des nouvelles méthodes de modélisation des impacts environnementaux qui dépendent des spécificités spatiales. La proposition de décrire les flux élémentaires d'un ICV par des distributions temporelles est une nouvelle idée intéressante, (Levasseur et al. 2010) mais l'obtention d'un ICV caractérisé de cette manière n'est pas expliqué (faiblesse *TP2-4*).

Finalement, il faut aussi remarquer que la caractérisation spatiotemporelle des ICVs est un sujet récent dans les publications sur les développements de la méthode ACV. Cette situation explique probablement la faible quantité de discussions sur l'établissement de correspondance entre des ICVs caractérisés au niveau, soit spatial, soit temporel et les différentes méthodes de modélisation des impacts environnementaux qui dépendent de spécificités spatiales ou temporelles. L'établissement de ces correspondances nécessite toutefois des hypothèses qu'il faut analyser en détail puisqu'elles peuvent avoir des effets sur les résultats d'une étude ACV (faiblesses *SP3-1* et *TP3-1*).

[i] Une modélisation ACV équitable ne néglige pas des caractéristiques qui ont un effet important sur les résultats d'une étude. Les principes généraux de complétude et de cohérence sont liés à une évaluation équitable.
[ii] L'efficacité de mise en œuvre sera définie dans le chapitre 4

Résumé de l'analyse des forces et faiblesse des considérations spatiotemporelles

La discussion sur les forces et faiblesses méthodologiques de la considération des spécificités spatiotemporelles dans la méthode ACV qui se base sur l'analyse des concepts présentés au chapitre 2 indique qu'il faut encore travailler au développement de cette méthode. Des développements méthodologiques sont nécessaires surtout pour favoriser la mise en œuvre des considérations spatiotemporelles dans la modélisation ACV de différentes études. La proposition de nouveaux développements méthodologiques doit se concentrer sur la deuxième phase (modélisation du système et calcul du cycle de vie) qui accuse un retard par rapport aux autres phases. Il faut cependant noter que toutes les phases de la méthode ACV sont inter reliées et que les propositions de développements doivent se faire en considérant la globalité de cette méthode.

L'emphase sur certaines faiblesses de mise en œuvre de la méthode ACV ne veut pas dire qu'il n'existe pas d'autres faiblesses, mais que celles-ci ne semblent pas être un frein aussi important, à court terme, pour la considération des spécificités spatiotemporelles dans différentes études ACV.

Il faut aussi noter que le manque d'uniformité du lexique touchant les questions temporelles (faiblesses *TG-2*) n'a pas été soulevé dans cette discussion à cause de la simplicité du concept. Il est toutefois important de le traiter rapidement pour améliorer la clarté des discussions subséquentes et c'est pourquoi la section 3.2 clarifie les utilisations du terme dynamique.

3.2 Proposition pour le vocabulaire relatif aux considérations temporelles

La majorité du vocabulaire lié aux considérations spatiotemporelles et qui nécessite une clarification est définie dans le lexique du document (voir p. XXIII). Toutefois, le terme dynamique est utilisé pour représenter deux types d'études considérant des spécificités temporelles et il convient d'en discuter plus en détail pour clarifier ce concept.

3.2.1 Apparition du concept de modèle dynamique

La communication la plus ancienne qui a été trouvée et qui utilise le terme dynamique pour définir une étude ACV date de 1999 (Cole et al. 1999). Le sens exact du terme n'est cependant pas clairement identifiable, mais il doit se lier à la définition du dictionnaire qui indique que dynamique est un adjectif utilisé pour décrire une évolution temporelle. Il parait ensuite logique d'en déduire que des études ACV dynamique doivent considérer les modifications temporelles de différents aspects de la modélisation. Cette notion est aussi clairement identifiée comme une exigence de la méthode ACV dans les normes ISO 14 040 et 14 044 même si le terme dynamique n'est pas utilisé. L'utilisation du terme dynamique sert donc à distinguer des études qui respectent cette exigence. Il existe plusieurs exemples qui respectent partiellement ou totalement cette exigence et qui peuvent servir de base pour décrire les deux utilisations du terme dynamique.

3.2.2 Modélisation dynamique des systèmes

Un premier type d'étude ACV dynamique utilise cette qualification parce qu'il considère les modifications dans le temps des systèmes modélisés et des processus les constituant. Toutes les études ACV considérant une modification du mix énergétique sur le cycle de vie du produit évalué sont des exemples de ce type d'ACV dynamique (Collinge et al. 2011; Collinge et al. 2012; Herfray and Peuportier 2012; Pehnt 2006). Ce type d'étude est souvent lié à un modèle plus ou moins complexe qui décrit les changements du système dans le temps. Il s'agit en fait de l'équivalent d'une modélisation de système qui considère le changement de technologie sur le cycle de vie du système analysé. Il faut toutefois souligner que la plupart de ces études n'expliquent pas comment la caractérisation temporelle est obtenue pour décrire l'ICV et si la modélisation des impacts environnementaux considère le moment d'émission comme une variable.

3.2.3 Modélisation dynamique des impacts environnementaux

Un deuxième type que l'on qualifie également d'étude ACV dynamique prend en considération la variabilité temporelle des FCs pour modéliser des impacts environnementaux. Un exemple de ce type de modélisation est présenté dans les publications de Levasseur et al (Levasseur et al. 2010; Levasseur *et al.* 2012). Dans ce cas particulier, la variabilité temporelle des FCs est définie par rapport à un horizon qui peut lui aussi varier. L'utilisation de cette méthode de modélisation nécessite des ICVs désagrégés au niveau temporel pour relier les flux élémentaires aux FCs qui y correspondent. Ce type d'étude ne s'applique aujourd'hui qu'à des systèmes simples où la distribution temporelle des flux élémentaires peut facilement être modélisée.

3.2.4 Discussion sur l'utilisation de l'adjectif dynamique

Les études ACV dynamiques considèrent aujourd'hui la variabilité dans le temps des systèmes et/ou des impacts environnementaux modélisés. Le sujet de la caractérisation temporelle n'y est cependant pas directement indispensable puisqu'il est possible de considérer une variabilité sans la modéliser explicitement. Aucune proposition à la méthode ACV n'a cependant été trouvée pour décrire une modélisation qui évolue avec l'apport de nouvelles informations plus représentatives des systèmes et impacts environnementaux modélisés. Il s'agirait cependant d'un troisième type de modélisation ACV qui pourrait être qualifié de dynamique.

3.3 Propositions pour atteindre l'objectif général de la thèse

La section 3.1 présente le positionnement et une discussion sur les forces et faiblesses méthodologiques pour la considération des spécificités spatiotemporelles dans la méthode ACV. Les conclusions de ces discussions permettent d'envisager une liste de propositions pour faire progresser le niveau de considération des spécificités spatiotemporelles dans des études ACV. Par souci de clarté, la discussion se divise entre les considérations spatiales et temporelles. Des propositions sont élaborées pour chacune des faiblesses.

3.3.1 Propositions au niveau spatial

Propositions pour l'utilité de la caractérisation des BDDs (*SP2-1*)

La sous-section 2.4.1 (voir p. 2-19) décrit le type d'information spatiale qui est disponible dans les BDDs utilisées pour la modélisation des systèmes dans les études ACV. La caractérisation standard, bien qu'utile, n'est pas suffisamment précise quand elle est comparée aux besoins actuels des méthodes de modélisations qui considèrent la variabilité des effets en fonction des spécificités régionales. La troisième version de la BDD ecoinvent propose un nouveau type de caractérisation spatiale qui répond mieux aux attentes des développeurs de méthodes de modélisation des impacts environnementaux. Il n'y a cependant pas de discussion sur la précision à atteindre pour la caractérisation spatiale sous ce nouveau format. Une discussion à ce sujet est pourtant utile pour identifier le niveau de désagrégation à rechercher au niveau spatial. L'identification de ce niveau permettra ensuite de faire une évaluation, au moins qualitative, de l'accroissement de la taille des BDDs et donc du travail qui reste à accomplir pour considérer les spécificités spatiales d'une majorité de systèmes de l'activité humaine. Il faut donc :

1-Discuter du format et du niveau de précision utile pour la caractérisation spatiale

En opposition à cette proposition, il ne faut pas négliger la difficulté à obtenir différentes informations caractérisées au niveau spatial. Il est compréhensible que la 3e version d'ecoinvent ne renseigne pas tous les processus définissant des systèmes qui sont différents au niveau spatial. Il sera cependant difficile de renseigner tous ces systèmes puisqu'il faudra, en théorie, modéliser toutes les spécificités spatiales de l'activité humaine. Il semble alors pertinent de chercher des moyens pour réduire le temps de travail nécessaire pour la description spatiale des processus à un niveau de détail suffisant pour faire des distinctions entre différents scénarios d'étude ACV. Il faut donc :

2-Evaluer comment minimiser le temps de travail pour la caractérisation spatiale des systèmes

Propositions pour l'évaluation de la pertinence des modes de caractérisation spatiale (*SP2-3*)

Deux modes de caractérisation spatiale des systèmes sont déjà utilisés par différentes BDDs. Le choix de ces deux modes (voir p. 2-20 et p. 2-21) n'est cependant pas argumenté. Il est alors difficile d'évaluer la pertinence de ceux-ci. Le terme pertinence est utilisé ici, mais il n'existe aucun cadre pour définir la pertinence d'un mode de caractérisation spatiale. Il faut donc, dans un premier temps :

3-Créer un cadre d'évaluation des modes de caractérisation spatiale

La création d'un cadre d'évaluation des modes de caractérisation spatiale permettra ensuite de clarifier la logique d'une analyse comparative des différents modes de caractérisation spatiale existants. Il sera donc plus simple de :

4-Analyser comparativement les modes de caractérisation spatiale existants

Cette analyse comparative des modes de caractérisation spatiale existants doit permettre la sélection d'un mode standard. La recherche d'un standard est jugée nécessaire puisqu'il augmente l'interopérabilité entre les sources d'information et réduit potentiellement, ainsi, la quantité de travail pour la modélisation des systèmes. Il faut donc :

5-Sélectionner un mode standard de caractérisation spatiale à partir des analyses accomplies

Ces propositions devront se faire en ne négligeant pas que les deux modes de caractérisation spatiale requièrent deux méthodes de calcul différentes pour propager la caractérisation spatiale à l'ICV ou à l'étape de modélisation des impacts environnementaux (voir p. 2-26 et 2-27).

Proposition pour établir la correspondance entre les ICVs et les besoins des méthodes (*SP3-1*)

Mutel et al (2011) ont récemment proposé une méthode pour établir la correspondance entre le maillage spatial définissant les processus d'un système et le maillage spatial de différentes méthodes de modélisation d'impacts environnementaux. Etablir cette correspondance requiert certaines hypothèses qui ont un effet sur la phase d'interprétation des résultats d'une étude ACV. Les discussions sur ce sujet restent, cependant, peu fréquentes et diminuent la capacité d'automatisation de la méthode ACV, ce qui pourrait augmenter le temps de travail pour différentes études. Il faut donc :

6-Discuter des méthodes permettant d'établir une correspondance entre un ICV caractérisé au niveau spatial et les méthodes de modélisation des impacts environnementaux variable au niveau spatial

Une discussion sur le maillage spatial doit automatiquement être liée à la discussion sur le niveau de précision utile pour la caractérisation spatiale lors de la modélisation des systèmes. Il sera donc important de considérer ce lien lors de ces deux discussions.

3.3.2 Propositions au niveau temporel

Propositions pour l'utilité de la caractérisation temporelle des BDDs (*TP2-1*)

La caractérisation temporelle des BDDs requiert une désagrégation de l'information qui risque d'augmenter grandement le temps de travail pour la modélisation des systèmes dans une étude ACV. Les niveaux de désagrégation (précision de la caractérisation) utiles ne sont toutefois pas déterminés même s'ils ont une incidence directe sur le temps de travail nécessaire à la modélisation des systèmes. Cette situation est préoccupante et il convient de s'en soucier. Il faut donc :

7-Discuter du format et du niveau de précision utile pour la caractérisation temporelle

Le niveau de précision de la caractérisation temporelle n'est pas le seul critère qui influence le temps de travail lié à la modélisation des systèmes dans une étude ACV. Il faut aussi évaluer la quantité de données qui est nécessaire pour une caractérisation temporelle utile des différents systèmes de l'activité humaine. C'est le type de distinction temporelle des systèmes qui influence l'utilité de la caractérisation temporelle des systèmes. Il faut alors identifier comment la distinction temporelle de différents systèmes peut avoir une influence sur le temps de travail nécessaire à la modélisation du système. Pour résumé, il faut donc :

8-Evaluer comment minimiser le temps de travail pour la modélisation temporelle des systèmes

Propositions pour l'évaluation de la pertinence du mode de caractérisation temporelle (*TP2-3*)

La période de validité de la définition des processus et le moment de création d'une fiche de données sont les seules informations temporelles disponibles aujourd'hui dans les BDDs du domaine ACV. Ce mode de caractérisation permet une analyse de la représentativité des systèmes, mais ne peut être utilisé pour considérer la variabilité temporelle des impacts environnementaux. Heijungs et Suh (2002) proposent un mode de caractérisation où il faut définir la période de chaque flux élémentaire pour chaque scénario tout en indiquant que ce mode n'est pas viable à cause de la quantité de travail qu'il requiert pour la modélisation des systèmes de l'activité humaine. Levasseur et al. (2010) proposent que les résultats d'ICV soient décrits par des distributions temporelles définissant les flux élémentaires afin de pouvoir utiliser la méthode de modélisation dynamique des impacts environnementaux qu'ils ont conçue. Cette proposition nécessite donc au moins une nouvelle information pour caractériser les BDDs du domaine ACV. Il faut donc :

9-Proposer un mode de caractérisation temporelle qui permet l'utilisation de distributions temporelles

Un ouvrage (Heijungs and Suh 2002) discute du calcul d'ICV caractérisé au niveau temporel. Il est indiqué dans celui-ci que la propagation de la caractérisation temporelle peut se faire de la même manière que pour la propagation des caractéristiques spatiales (voir p. 2-26). La discussion de la section 9.3 de cet ouvrage (p. 194) souligne aussi que ce type de caractérisation sera restreint en pratique et qu'il faudra toujours traiter le temps comme un paramètre discret. Cette possibilité ne s'applique donc pas nécessairement à une caractérisation par des distributions temporelles. Il semble donc pertinent de :

10-Analyser les contraintes provenant du calcul d'un ICV caractérisé au niveau temporel

Les conclusions de cette analyse permettront ensuite de :

11-Définir une méthode de calcul d'ICV qui permet la propagation de la caractérisation temporelle

Une fois qu'un mode de caractérisation temporelle est défini pour la modélisation des systèmes, il faut évaluer sa pertinence comme pour l'évaluation de la pertinence des modes de caractérisation spatiale. Plusieurs critères peuvent être considérés dans l'évaluation de la pertinence d'un mode de caractérisation temporelle. La création requiert donc de choisir des critères pour évaluer la pertinence du mode de caractérisation temporelle retenu. Il faut donc :

12-Créer un cadre d'évaluation de modes de caractérisation temporelle

La définition du cadre d'évaluation de modes de caractérisation temporelle ouvre ensuite la porte à une analyse de la pertinence du ou des modes qui ont été proposés. Il devient alors possible de :

13-Analyser le ou les modes de caractérisation temporelle proposés

Une fois l'évaluation du ou des modes de caractérisation temporelle accomplie, il sera intéressant de proposer un standard de caractérisation temporelle qui pourrait servir pour la description des différentes sources d'information utilisées dans les études ACV. Ce standard devrait faciliter le partage et l'utilisation de l'information entre différentes sources afin de minimiser le temps de travail nécessaire à la modélisation de systèmes caractérisés au niveau temporel. Il faut donc :

14-Sélectionner un mode standard de caractérisation temporelle à partir des analyses accomplies

Proposition pour établir la correspondance entre les ICVs et les besoins des méthodes (*TP3-1*)

Tel que mentionné précédemment, il n'existe pas de mode standard de caractérisation temporelle des systèmes (aucune mention dans la définition de différentes BDDs). Il existe une proposition pour obtenir un ICV caractérisé au niveau temporel qui s'apparente à la méthode standard de propagation des caractéristiques spatiales. Une méthode de modélisation dynamique des impacts environnementaux est proposée (Levasseur et al. 2010). L'analyse de ces trois aspects et la proposition de nouvelles solutions sont aussi envisagées dans les pages précédentes. Une réflexion sur la correspondance entre ces nouvelles idées permettra d'identifier comment lier des valeurs d'ICV caractérisé au niveau temporel avec des méthodes de modélisation dynamique d'impacts environnementaux qui pourraient ne pas utiliser la même discrétisation temporelle. Il faut donc :

15-Discuter des méthodes permettant d'établir une correspondance entre un ICV caractérisé au niveau temporel et les méthodes de modélisation des impacts environnementaux variable au niveau temporel

Il faut ajouter qu'une seule méthode de modélisation d'impacts environnementaux considérant la variabilité temporelle des effets des flux élémentaires est proposée aujourd'hui. Il s'agit de la méthode dite dynamique de modélisation des effets des gaz à effet de serre proposée par Levasseur et al (2010). Les effets dans le temps des flux élémentaires peuvent varier aussi pour d'autres catégories d'impacts environnementaux. Il faut donc que d'autres méthodes soient développées. Le développement de ces méthodes n'est toutefois pas retenu dans ce travail puisque, comme le démontrent certains travaux de thèse (Levasseur 2011), cette question est trop vaste pour s'ajouter aux propositions déjà identifiées.

3.3.3 Résumé des propositions de développement

Une comparaison des propositions de développement aux niveaux spatial et temporel permet rapidement d'identifier des correspondances. Il devient alors plus simple de faire une liste qui combine les propositions équivalentes en combinant les termes spatial et temporel par spatiotemporel. Un travail en parallèle de ces deux aspects permet ainsi d'utiliser des développements existants pour les aspects spatiaux et de les appliquer, si possible, à des développements pour les aspects temporels. Le tableau 3-3 présente un résumé des propositions de développement retenues pour faire évoluer le niveau de considération des spécificités spatiotemporelles lors de la mise en œuvre de la méthode ACV.

Tableau 3-3 : Proposition de développements méthodologiques retenus pour la considération des spécificités spatiotemporelles lors de la mise en œuvre d'une étude ACV

Combinaisons	Indices	Liste de propositions pour le développement
1+7	**P1**	Discuter du format et niveau de précision utile pour la caractérisation spatiotemporelle
2+8	**P2**	Evaluer comment il est possible de minimiser le temps de travail nécessaire à la caractérisation spatiotemporelle des systèmes modélisés
3+12	**P3**	Créer un cadre d'évaluation de modes de caractérisation spatiotemporelle
4+13	**P4**	Analyser les modes de caractérisation spatiotemporelle selon le cadre
5+14	**P5**	Sélectionner un mode standard de caractérisation spatiotemporelle à partir des analyses accomplies
6+15	**P6**	Discuter des méthodes permettant d'établir une correspondance entre un ICV caractérisé au niveau spatiotemporel et les méthodes de modélisation des impacts environnementaux variable au niveau spatiotemporel
9	**P7**	Proposer un mode de caractérisation temporelle qui permette l'utilisation de distributions temporelles
10	**P8**	Faire l'analyse des contraintes provenant du calcul d'un ICV caractérisé au niveau temporel
11	**P9**	Définir une méthode de calcul d'ICV qui permette la propagation de la caractérisation temporelle

Il faut revenir sur l'ordre de traitement de ces propositions et les liens entre celles-ci avant d'organiser le travail des chapitres suivants de la thèse.

3.4 Définition et organisation des objectifs spécifiques de la thèse

Les liens entre les différentes propositions imposent la mise en place d'un ordre à suivre dans l'organisation du travail de recherche. C'est la construction de cette structure qui permet d'organiser l'ordre des objectifs spécifiques de la thèse.

3.4.1 Effets de la structure de la méthode ACV sur l'organisation du travail

Toutes les propositions définies dans le tableau 3-3 sont liées entre elles par la structure de la méthode ACV et plus particulièrement par la structure de la deuxième phase. Il faut donc considérer ces liens avant de définir le détail et l'ordre dans lequel il faudra traiter ces propositions.

Structure de la deuxième phase

La deuxième phase de la méthode ACV définit l'étape de la modélisation du système et l'étape du calcul de l'ICV. Une description de la structure de cette phase permet d'identifier les liens entre les différentes étapes et considérations qui touchent les propositions retenues. Cette description permet aussi de mieux comprendre la distinction à faire entre les sources d'informations (BBDs et autres) et un inventaire cycle de vie (ICV). La figure 3.1 présente un schéma de la structure de la deuxième phase pour mieux comprendre les liens entre les propositions présentées dans la section précédente.

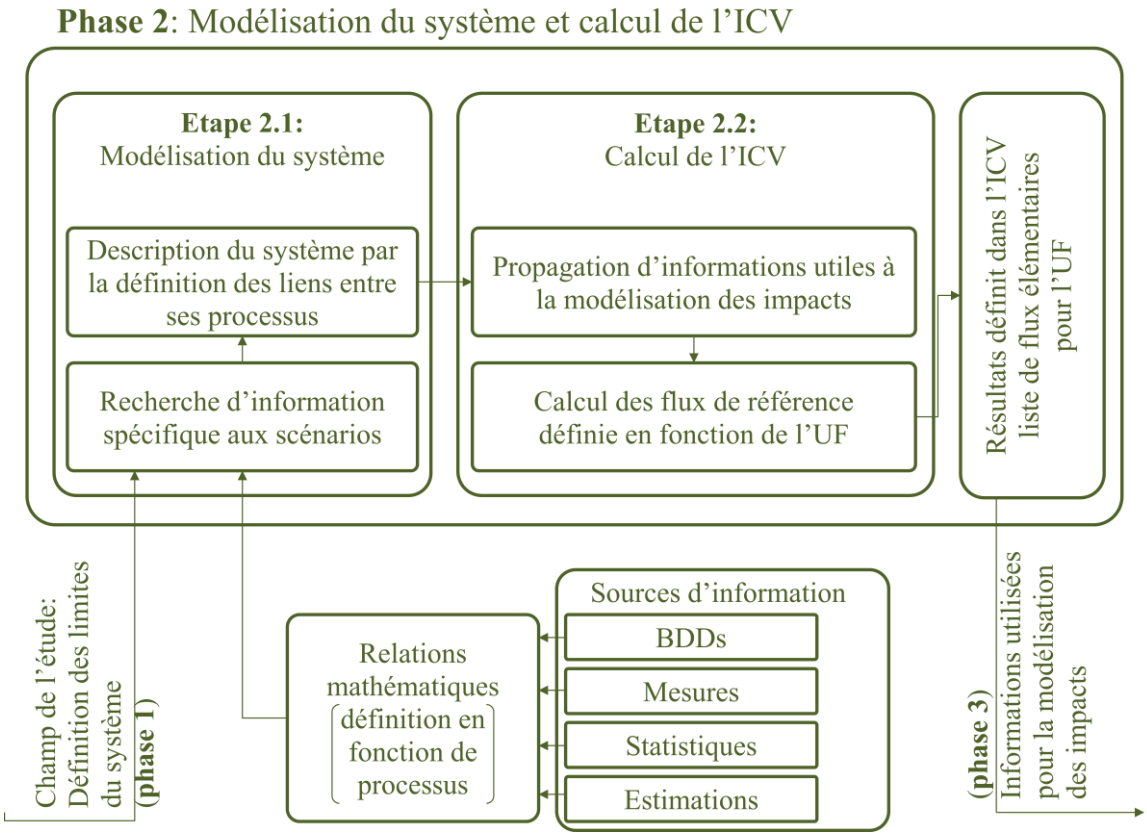


Figure 3.1 : Description de la structure de la deuxième phase de la méthode ACV. Cette phase combine la modélisation de systèmes et le calcul d'ICV. Plusieurs facettes d'une étude ACV sont en lien avec cette phase comme les sources d'informations qui sont utilisées pour la description des scénarios et systèmes. Les relations mathématiques présentées ici soulignent la nécessité de transformer les valeurs provenant des sources d'information sous un format de processus qui est l'unité de base de modélisation d'un système.

Commentaires spécifiques sur les liens entre les différentes propositions de développement

Quelques commentaires spécifiques peuvent être faits sur les liens et l'ordre de traitement des propositions à partir de l'information de la figure 3.1.

Proposition **P1** *:*

Le niveau de précision nécessaire pour la caractérisation spatiotemporelle est un sujet qui touche toutes les étapes de modélisation. Elle dépend des systèmes modélisés, des spécificités des méthodes de modélisations des impacts environnementaux existantes et des besoins d'analyse. Dans un monde parfait, il faut que le niveau de précision de la caractérisation permette d'obtenir des résultats d'ACVI qui soient suffisamment précis pour départager différents scénarios d'une étude. En pratique, il faut surtout que le niveau de précision soit représentatif du niveau de connaissance sur la caractérisation lors de la modélisation du système. C'est plutôt sur cette question de représentativité qu'une discussion doit porter.

Proposition **P2** *:*

Dans le cadre de cette thèse, la minimisation du temps de travail pour la modélisation des systèmes touche seulement la question de l'ajout de la caractérisation spatiotemporelle. Elle est liée directement à l'étape de modélisation des systèmes ce qui veut dire que les modes de caractérisation devraient s'appliquer aux sources d'informations utilisées pour la modélisation des systèmes, dans le cas choisi, les BDDs. Il serait aussi intéressant qu'il s'agisse d'une caractérisation qui est directement utilisable pour l'ICV. L'idée est de trouver des modes de caractérisation qui minimise le temps de travail relié à la désagrégation spatiotemporelle, qui est maintenant considéré comme utile, lors de la phase de modélisation du système.

Proposition **P3** *:*

La définition d'un cadre d'évaluation des modes de caractérisation spatiotemporelle est utile pour faire l'analyse de la pertinence des différents modes existants ou proposés. Il s'applique donc aux sources d'information (BDDs) qui utilisent ces modes de caractérisation. Il n'existe pas aujourd'hui de cadre pour ce type d'évaluation, mais les principes généraux et les conditions d'utilisation de la méthode ACV peuvent servir de base pertinente pour définir un tel cadre. La caractérisation spatiale n'étant pas très différente de la caractérisation temporelle, il semble aussi possible que l'évaluation se fasse selon des critères comparables, ce qui explique qu'il s'agisse d'un cadre d'évaluation des modes de caractérisation spatiotemporelles.

Proposition **P4** *:*

Une fois que le cadre d'évaluation des modes de caractérisation spatiotemporelle est défini. Il devient possible de l'utiliser pour évaluer les deux modes de caractérisation spatiale et le mode de caractérisation temporelle existants. Cette évaluation doit permettre l'identification d'un mode qui soit plus pertinent pour devenir un standard.

Proposition **P5** *:*

Une fois que les différents modes de caractérisation spatiale et temporelle sont évalués par rapport au cadre défini, il devient possible de faire un choix stratégique pour définir un mode standard de caractérisation spatiotemporelle pour la description des sources d'information.

Proposition **P6** *:*

Tel que mentionné précédemment, la caractérisation spatiotemporelle d'un ICV peut ne pas correspondre aux maillages et périodes utilisés dans la définition de FCs de différentes méthodes de modélisation des impacts environnementaux. La faible quantité de discussions sur l'établissement de ce type de correspondance impose une discussion plus détaillée sur ce sujet. Cette discussion ne doit pas négliger d'une proposition qui touche l'étape du calcul d'ICV et la troisième phase de la méthode ACV.

Proposition **P7** *:*

Aucune proposition claire n'a été faite aujourd'hui sur la caractérisation temporelle lors de la modélisation des systèmes dans une étude ACV. Ce type de proposition est directement en lien avec les sources d'informations utilisé, mais doit considérer la propagation de l'information dans le calcul d'ICV et l'utilité d'une telle caractérisation pour la modélisation des impacts environnementaux. La possibilité d'utiliser des distributions temporelles doit être évaluée.

Proposition **P8** *:*

L'analyse des contraintes pour le calcul d'un ICV caractérisé au niveau temporel est en lien avec la méthode actuellement proposée par Heijungs et Suh (2002). Il faut donc analyser les commentaires de ces auteurs sur les capacités limitées de cette méthode de calcul et proposer des pistes de solutions.

Proposition **P9** *:*

Une fois que la proposition **P8** sera accomplie, il sera possible de proposer une méthode de calcul d'ICV qui permet la propagation des caractéristiques temporelles. Cette méthode doit pouvoir utiliser l'information provenant de systèmes caractérisés au niveau spatiotemporelle et permettre l'obtention d'ICVs caractérisés au niveau temporelle. Ces ICVs caractérisés doivent aussi être utiles à la phase de modélisation des impacts environnementaux.

3.4.2 Objectifs spécifiques de la thèse

Ces neuf propositions de développements permettent maintenant la définition des objectifs spécifiques de la thèse et leur articulation en fonction des liens entre ces propositions.

Les propositions sont organisées selon trois grandes étapes de propositions qui sont nommées **A**, **B** et **C**. L'étape **A** porte sur les modes de caractérisation spatiotemporelle des sources d'information utilisées pour la modélisation des systèmes. L'étape **B** porte sur la définition d'une méthode de calcul d'ICV permettant l'utilisation des caractéristiques spatiotemporelles servant à décrire le système pour en faire la propagation dans les ICVs. L'étape **C** porte sur les discussions en lien avec l'utilisation des ICVs caractérisés au niveau spatiotemporel pour la modélisation des impacts environnementaux.

Etape A : Définition d'un mode de caractérisation spatiotemporelle

L'objectif final lié à cette catégorie est d'obtenir un mode de caractérisation spatiotemporelle qui puisse servir de standard pour la caractérisation spatiotemporelle des sources d'information utilisées pour la modélisation des systèmes dans différentes études ACV. Cet objectif répond directement à la proposition **P5**. Le premier sous-objectif pour répondre à cet objectif final est lié à la proposition **P3**. Il faut donc commencer par définir un cadre d'évaluation des modes de caractérisation spatiotemporel. C'est ce cadre qui permet de répondre aux propositions **P4** et **P7**. L'analyse des modes de caractérisation spatiale et temporelle qui existe ou qui sera proposée peut, en effet, se faire à partir de ce cadre d'évaluation. La proposition **P2** qui requiert une réflexion sur les moyens à utiliser pour minimiser le temps de travail supplémentaire nécessaire à la désagrégation spatiotemporelle doit être liée à la définition de ce cadre. L'analyse des modes de caractérisation spatiale à partir de ce cadre peut aussi servir à la proposition **P7** puisque les connaissances acquises dans cette analyse devraient être utiles à la définition d'un mode de caractérisation temporelle.

L'explication précédente permet de définir le premier objectif spécifique de la manière suivante :

Proposer un mode standard de caractérisation spatiotemporelle des sources d'informations qui minimise les difficultés causées par une désagrégation spatiotemporelle du système modélisé

Quatre sous-étapes sont proposées pour définir ce mode de caractérisation :

1. Créer un cadre d'évaluation de la pertinence des modes de caractérisation spatiotemporelle
    - Identifier les difficultés causées par la désagrégation spatiotemporelle des processus
        i. Lien avec les propositions **P1**, **P2**, **P7** et **P8** à considérer
    - Définir des critères de pertinence
    - Définir des conditions pour la validité d'un mode de caractérisation
2. Evaluer les modes de caractérisation existants en fonction du cadre
    - Comparer les modes de caractérisation spatiale décrits dans la sous-section 2.4.1
    - Examiner la proposition du mode de caractérisation temporelle de Heijungs et Suh
3. Proposer un mode de caractérisation temporelle qui utilise les distributions temporelles
    - Tenir compte des conclusions de l'analyse des autres modes de caractérisation
        i. Lien supplémentaire à discuter avec la proposition **P9**
4. Définir un mode standard de caractérisation spatiotemporelle
    - Choisir un mode de caractérisation spatiale plus performant en fonction des conclusions de l'évaluation comparative des deux modes existants
    - Choisir un mode de caractérisation temporelle qui est en lien avec la proposition du sous-objectif précédent (#3)
    - Résumé les spécificités du mode de caractérisation spatiotemporelle retenu
        i. Particularités
        ii. Avantages
        iii. Inconvénients

Etape B : Méthode de calcul pour obtenir des ICVs caractérisés au niveau spatiotemporel

L'objectif final lié à cette catégorie est de proposer une méthode de calcul d'ICV utilisant des données caractérisées au niveau spatiotemporel avec le mode standard retenu. Les caractéristiques spatiotemporelles des systèmes modélisés doivent donc se propager aux différents flux élémentaires répertoriés dans un ICV. Cet objectif est lié à la proposition **P9**. La méthode de calcul doit aussi considérer l'utilité de la caractérisation spatiotemporelle des flux élémentaires pour la modélisation des impacts environnementaux. L'objectif spécifique se résume donc à :

Développer une méthode de calcul pour obtenir des ICVs caractérisés au niveau spatiotemporel

Quatre sous-étapes sont proposées pour créer une nouvelle méthode de calcul d'ICV :

1. Décrire les particularités mathématiques de la description des systèmes modélisés avec le mode de caractérisation spatiotemporelle standard retenu
2. Expliquer comment définir l'information de la modélisation des systèmes dans l'équation du calcul d'ICV
    - Régler les problèmes s'il y a lieu
3. Définir les spécificités de l'ICV obtenu avec ces nouvelles données d'entrées
4. Discuter des méthodes pour établir une correspondance entre les caractéristiques spatiotemporelles de l'ICV et les besoins en description spatiotemporelle des méthodes de modélisation des impacts environnementaux (voir proposition **P6**)

Etape C : Mise en œuvre des considérations spatiotemporelles

L'objectif final lié à cette catégorie est de discuter des conséquences des développements proposés pour la méthode ACV lors de leurs mises en œuvre. Cet objectif requiert donc l'application des développements pour différents cas d'étude qui serviront à évaluer la performance du mode standard de caractérisation spatiotemporelle et de la nouvelle méthode de calcul d'ICV. Il est alors pertinent d'utiliser des exemples pour argumenter la discussion. Il semble tout à fait logique d'utiliser des exemples de scénarios de production d'énergie pour construire ces exemples puisqu'il s'agit du domaine qui a permis d'expliquer la démarche logique menant à l'objectif général de la thèse. En effet, l'application de la méthode ACV sur des systèmes de production d'énergie renouvelable devrait faire ressortir l'utilité d'une caractérisation spatiotemporelle puisque ces systèmes sont dépendants de ces caractéristiques.

L'objectif spécifique se résume donc à :

Appliquer la méthode ACV modifié pour différents cas d'études permettant d'évaluer l'utilité des développements méthodologiques proposés auparavant

Six sous-étapes sont proposées pour la mise en œuvre des développements méthodologiques :

1. Revenir sur les détails qui démontrent la pertinence du domaine de la production d'énergie pour tester les développements pour la considération de spécificités spatiotemporelles
2. Présenter les développements testés
    - En lien avec les propositions **P1**, **P2**, **P5**, **P6** et **P9**
3. Expliquer le choix des systèmes qui servent de cas d'étude
4. Evaluer certains développements méthodologiques avec le premier cas d'étude
5. Evaluer d'autres développements méthodologiques avec le deuxième cas d'étude
6. Discuter des observations en lien avec l'application des développements sur les cas d'étude

3.5 Protocole pour la proposition et vérification de développements

Ce chapitre traduit les forces et faiblesses de mise en œuvre des considérations spatiotemporelles identifiées dans le chapitre 2 en une liste organisée d'objectifs spécifiques pour le développement de la méthode ACV à considérer les spécificités spatiotemporelles.

Les étapes A, B et C définissent trois listes d'objectifs et de sous-objectifs spécifiques. Il est nécessaire d'organiser le travail cet ordre. Le développement de ces trois étapes est donc présenté dans trois chapitres distincts.

En considérations ces arguments, le tableau 3-4 présente l'organisation de la thèse en définissant les objectifs spécifiques traités dans les trois prochains chapitres du document.

Tableau 3-4 : Protocole à suivre pour le développement des capacités de considération des spécificités spatiotemporelles dans la phase de modélisation des systèmes et du calcul d'ICV de la méthode ACV.

Etapes	Objectifs spécifiques	Chapitres
A	Proposer un mode standard de caractérisation spatiotemporelle des sources d'informations qui minimise les difficultés causées par une désagrégation spatiotemporelle du système modélisé	Chapitre 4
B	Développer une méthode de calcul pour obtenir des ICVs caractérisés au niveau spatiotemporel	Chapitre 5
C	Appliquer la méthode ACV modifié pour différents cas d'études permettant d'évaluer l'utilité des développements proposés	Chapitre 6

4 MODE DE CARACTERISATION SPATIOTEMPORELLE

Le chapitre 3 définit un protocole pour le développement des capacités de considération des spécificités spatiotemporelles dans la phase de modélisation des systèmes et du calcul d'ICV. L'étape A de ce protocole requiert la proposition d'un standard de caractérisation spatiotemporelle des sources d'informations utilisées dans différentes études ACV. La démarche pour obtenir ce standard se définit par une liste de sous-objectifs spécifiques (page 3-16).

Il faut donc :

- Créer un cadre d'évaluation de la pertinence des modes de caractérisation ;
- Evaluer les modes de caractérisation existants selon ce cadre d'évaluation ;
- Proposer de nouveaux modes en fonction des résultats des premières évaluations ;
- Définir un mode de caractérisation spatiotemporelle qui puisse être proposé comme standard ;

Le développement lié à ces sous-objectifs est présenté dans les différentes sections de ce chapitre.

La section 4.1 décrit donc le processus pour construire un cadre d'évaluation des modes de caractérisation spatiotemporelle. Les principes généraux de la méthode ACV et les difficultés typiques de mise en œuvre rencontrées lors de la considération des spécificités spatiotemporelles sont alors considérés (voir chapitre 2). Tous ces aspects permettent l'identification de critères de performance et de conditions de viabilité pour évaluer les modes de caractérisation.

La section 4.2 utilise ensuite le cadre d'évaluation pour analyser les avantages et inconvénients des modes de caractérisation existants (voir sous-section 2.4.1 pour la description de ces modes). L'identification des avantages et inconvénients doit approvisionner la discussion suivante pour la proposition de nouveaux modes qui seront plus pertinents.

La section 4.3 décrit alors les détails des propositions de nouveaux modes de caractérisation spatiale et temporelle qui se basent sur les apprentissages des analyses des modes de caractérisation existants. Un mode de caractérisation spatiale et un mode de caractérisation temporelle sont finalement présentés. Ces modes correspondent mieux aux critères et conditions du cadre d'évaluation.

La section 4.4 présente un récapitulatif des évaluations des modes de caractérisation existants et nouvellement proposés afin de bien comprendre pourquoi certains modes sont retenus pour la proposition d'un standard.

Une dernière section (4.4) présente un résumé du chapitre. Cette section est mise à disposition pour les lecteurs voulant rapidement connaître les tenants du nouveau mode de caractérisation spatiotemporelle proposée comme standard sans nécessairement avoir à lire le raisonnement complet expliquant les différents choix entourant le développement proposé.

4.1 Cadre d'évaluation des modes de caractérisation

L'évaluation des modes de caractérisation spatiale et temporelle existants requiert un cadre définissant leurs performances et des conditions pour que ceux-ci soient utiles.

L'objectif de cette section est donc de créer un cadre d'évaluation de la pertinence des modes de caractérisation spatiotemporelle.

Ce cadre repose sur la définition de critères de performances et de conditions de viabilité. Les discussions spécifiques sur le sujet de la pertinence des modes de caractérisation sont rares et peu développées. Il est alors nécessaire de fournir une explication sur le choix des aspects à considérer pour la caractérisation spatiotemporelle des systèmes modélisés. Cette explication utilise les conclusions de l'analyse de la méthode ACV (section 3.1) pour identifier les concepts les plus importants pour une modélisation ACV générale et, plus spécifiquement, pour la caractérisation spatiotemporelle.

4.1.1 Définitions de critères de performance

Identification des critères de performance

L'analyse de la méthode ACV présentée à la sous-section 3.1.1 indique que le frein le plus important à la considération des spécificités spatiotemporelles se résume, actuellement, au temps nécessaire pour renseigner la désagrégation spatiotemporelle des systèmes. C'est cette raison qui est aussi proposée pour expliquer le manque de spécificité spatiotemporelle des BDDs contemporaines. Il s'agit pourtant d'un effort nécessaire pour que la modélisation ACV devienne plus représentative. L'ajout de caractéristiques spatiotemporelles dans une BDDs semble donc incontournable.

Parallèlement à cette constatation, le choix d'un mode de caractérisation peut aussi influencer le temps de travail pour la description des systèmes puisqu'il définit comment informer ces caractéristiques pour différentes sources d'information comme les BDDs. Le choix d'un format et l'identification des informations à caractériser doivent être considérés en fonction des effets qu'ils peuvent avoir sur le temps de travail.

C'est pour ces raisons que la pertinence des modes de caractérisation doit être évaluée en fonction de l'effet qu'ils peuvent avoir sur le temps nécessaire à la modélisation des scénarios et systèmes.

La recherche d'une plus grande représentativité de la modélisation des impacts environnementaux passe, non seulement, par la considération des spécificités spatiotemporelles des systèmes et de l'environnement, mais aussi par une plus grande précision sur la description de ces spécificités. L'offre d'un haut niveau de précision, pour la caractérisation spatiotemporelle des systèmes, est donc recherchée. Ici, un haut niveau de précision ne veut pas dire qu'il faut obtenir le plus haut niveau de détail possible, mais plutôt qu'il faut obtenir un niveau de détail suffisant pour atteindre une variabilité suffisamment faible pour départager les résultats d'études ACV. Ce niveau de détail « nécessaire » peut varier en fonction des études, des systèmes modélisés et des catégories d'impacts environnementaux considérées. Il n'est donc pas possible de statuer sur le niveau de précision à atteindre dans l'absolu. Il est toutefois judicieux que le mode de caractérisation permette d'atteindre le niveau de précision « nécessaire ».

C'est pour ces raisons que le potentiel de précision lié au mode de caractérisation spatiotemporelle doit être un critère pour l'évaluation de sa pertinence face à la modélisation ACV.

Les deux critères identifiés sont ceux qui sont retenus pour l'évaluation de la pertinence des modes de caractérisation spatiotemporelle. L'analyse de ces critères pour les différents modes de caractérisation ne doit toutefois pas négligé le cadre général de la méthode ACV. Il faut donc considérer les principes généraux de la méthode ACV (voir sous-section 2.1.1) dans les discussions portant sur ces analyses en posant une priorité à la représentativité.

Description des critères retenus

Critère 1 : Temps de travail

Un mode de caractérisation spatiotemporelle peut affecter le temps de travail pendant différentes étapes d'une étude ACV et il faut discuter de chacune d'entre elles. Ces étapes sont :

- La recherche d'information
- La définition des fiches de données (pour une BDD)
- La modélisation des systèmes
- L'analyse des résultats et des systèmes

Critère 2 : Potentiel de précision

L'analyse du potentiel de précision doit décrire comment il affecte :

- La description des systèmes
- La phase de modélisation des impacts environnementaux

4.1.2 Définition des conditions de viabilité d'un mode de caractérisation

Ces conditions ne requièrent aucun jugement de valeur et soulignent surtout certaines contraintes que les modes de caractérisation doivent respecter pour conserver les capacités actuelles de la méthode ACV.

Identification et description des conditions de viabilité

Concept d'itération – gestion de précision variable

L'accomplissement d'une étude ACV est un travail itératif (voir sous-section 2.1.1). L'application de la notion d'itération pour les modes de caractérisation spatiotemporelle touche surtout la possibilité de modifier le niveau de précision de cette caractérisation pour différentes versions d'une étude. Il est donc utile que les modes de caractérisation permettent d'utiliser des informations avec une précision variable.

Propagation de la caractérisation spatiotemporelle

L'utilité principale de considérer les spécificités spatiotemporelles lors de la modélisation d'un système est d'offrir des informations pertinentes pour faire une modélisation représentative des impacts environnementaux. Il faut donc que toutes les informations pertinentes se retrouvent dans les résultats d'ICV. C'est donc dire qu'il faut que les modes de caractérisation spatiotemporelle permettent la propagation de la caractérisation entre l'étape de modélisation des systèmes et l'obtention d'un ICV. Un mode de caractérisation qui offrirait une information qui ne peut être transférée dans l'ICV devient donc inutile à ce niveau.

Utilité du format d'information pour la phase de la modélisation des impacts environnementaux

La dernière condition se lie à l'obtention des ICVs caractérisés au niveau spatiotemporel. Il faut, en effet, que les caractéristiques spatiotemporelles de l'ICV soient sous un format qui est utile à la modélisation des impacts environnementaux.

4.1.3 Evaluation des modes à partir du cadre d'évaluation

L'évaluation des différents modes de caractérisation spatiotemporelle est présentée dans les sections suivantes par une discussion sur chacun des critères et conditions énumérés dans cette section. Des tableaux récapitulatifs de ces discussions sont présentés aux pages 4-11, 4-17 et 4-25.

4.2 Evaluation des modes de caractérisation spatiotemporelle existants

Il existe aujourd'hui deux modes de caractérisation spatiale et un mode de caractérisation temporelle (sous-section 2.4.1). Cette situation conduit à un travail séparé sur les questions de caractérisation spatiale et temporelle. Pour résumer :

L'objectif de cette section est d'évaluer la pertinence des modes de caractérisation spatiale et temporelle existants en fonction du cadre défini dans la section 4.1

Ces évaluations vont ainsi permettre la proposition de deux nouveaux modes de caractérisation spatiale et temporelle tirant profit des apprentissages provenant de l'analyse des modes existants.

La sous-section 4.2.1 présente l'évaluation des deux modes de caractérisation spatiale existants. Une évaluation comparative de ces deux modes est ensuite utilisée afin d'obtenir une perspective plus globale des difficultés de caractérisation spatiale lors de la modélisation des systèmes. La sous-section 4.2.2 présente, quant à elle, l'évaluation du mode de caractérisation temporelle basé, en partie, sur les commentaires provenant de l'ouvrage de Heijungs et Suh (2002) et sur l'utilisation de distribution temporelle.

4.2.1 Evaluation de modes de caractérisation spatiale

Les deux modes de caractérisation spatiale se différencient tant au niveau du format de la caractérisation qu'au niveau des liens établis dans la structure de modélisation des systèmes. Ils sont tous les deux décrits en détail dans la sous-section 2.4.1 (pages 2-20 et 2-21). Le mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 1.0 est analysé en premier afin qu'il puisse servir de référence. Il semble, en effet, logique de choisir le mode de caractérisation le plus utilisé comme référence du niveau de développement actuel.

Evaluation du mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 1.0

Voici, tout d'abord, un bref récapitulatif des aspects importants de ce mode qui définit le format spécifique et les liens utilisés au sein de la structure de modélisation des systèmes.

Pour ce mode, les liens établis entre la caractérisation spatiale et les informations servant à modéliser les systèmes se font au niveau des flux élémentaires (d'où le nom). Chaque flux élémentaire d'un processus est caractérisé au niveau spatial par un compartiment et sous-compartiment. La caractérisation spatiale reste relative à la définition du processus puisque les flux élémentaires sont relatifs aux processus. Il faut, par conséquent, choisir des processus ayant une spatialité spécifique afin de modéliser le système de manière représentative. Par exemple, deux processus de fabrication de cellules solaires équivalents au niveau technique, mais situé dans des régions présentant des densités de population différente doivent être décrits par deux processus différents dans une BDD.

Le format de caractérisation spatiale de ce mode est conceptuel et non-géographique et se divise entre les catégories de compartiments et sous-compartiments (voir tableau 2-3, page 2-20). Les compartiments divisent l'environnement entre les sections air, eau, sol et ressources naturelles (extractions). Les sous-compartiments sont, quant à eux, plus précis dans la taille des descriptions spatiales qu'ils représentent, mais ne donnent pas la position géographique des flux élémentaires. A titre d'exemple, il existe plusieurs régions possédant des rivières et il n'est donc pas possible, avec ce mode de caractérisation spatiale, de distinguer les flux élémentaires provenant de deux barrages hydroélectriques ayant lieu dans deux rivières différentes.

Evaluation selon les critères de performance

Cette évaluation est normalement comparative et elle est donc difficilement applicable à ce mode qui est la référence actuelle de caractérisation spatiale pour les BDDs servant à la modélisation de systèmes dans différentes études ACV. Il est toutefois pertinent d'identifier les avantages et inconvénients de ce mode de caractérisation.

Critère 1 : minimiser le temps de travail

Recherche d'informations

Le temps de travail relié à la recherche d'information sur la caractérisation spatiale est minimal, dans ce cas, puisque le niveau de précision recherché est faible ce qui rend l'information facile à trouver. Par exemple, il est plus difficile de connaître la nature des émissions reliées à la chaîne de production de plaquette de silicium que de savoir si elles ont lieu dans l'air, l'eau ou le sol. Les sous-compartiments sont presque aussi faciles à identifier.

Définition des fiches de données

La définition de compartiments et sous-compartiments pour chaque flux élémentaire d'un processus défini dans une fiche de données est considérée comme le temps de référence pour la caractérisation spatiale lors de la modélisation d'un système. Il servira surtout de base de comparaison pour évaluer l'effort de travail supplémentaire induit par les autres modes de caractérisation.

Modélisation des systèmes

Ce mode de caractérisation spatiale permet, pour un même processus, de définir qu'un certain flux élémentaire est émis dans l'eau d'une rivière et qu'un autre se dissipe dans l'air au niveau de la stratosphère même si ces deux domaines spatiaux sont différents et séparés. Ce degré de flexibilité dans la description spatiale permet d'utiliser différents cadres (niveau d'agrégation) pour le périmètre du processus. Il est donc possible pour un analyste de modéliser des systèmes de manière très agrégée tout en conservant un même niveau de précision spatiale. Une augmentation de la précision au niveau de la caractérisation n'est donc pas synonyme d'un temps de travail supplémentaire pour la modélisation du système.

Analyse des résultats et des systèmes

Si l'analyse du système nécessite une précision spatiale supérieure au sous-compartiment, le mode de caractérisation ne peut répondre à ce besoin car il faut revenir aux différentes informations disponibles dans chaque fiche de données. C'est pourquoi le temps de travail relié à l'interprétation des résultats est aussi important. En fait, l'information sur les caractéristiques spatiales ne peut être évaluée par les résultats, mais bien par une connaissance détaillée de la BDD décrivant le système analysé dans un scénario.

Critère 2 : potentiel de précision

Description des systèmes

Ce mode de caractérisation ne possède que deux niveaux de précision différents qui se situent soit au stade de compartiment ou de sous-compartiment. Il n'est donc pas possible d'ajouter à la précision au-delà d'une description du sous-compartiment. Ce mode de caractérisation propose donc un faible potentiel de précision spatiale pour la description du système.

Modélisation des impacts environnementaux

Ce manque de précision de la description spatiale pose aussi problème pour les modélisations des impacts environnementaux. L'information est bien représentative de la spatialité des flux élémentaires retrouvés dans l'ICV, mais insuffisante pour faire une modélisation des impacts environnementaux qui soit suffisamment précise pour départager plusieurs scénarios d'ACV. En effet, comme expliqué dans la section2.5, une précision spatiale faible oblige l'utilisation de FCs possédant une grande variabilité pour plusieurs catégories d'impact.

Vérification des conditions de viabilité

Capacité de gestion d'une précision variable – Méthode itérative

Deux niveaux de précision n'offrent que peu de possibilités de gestion d'une précision variable dans la description spatiale des systèmes. Il est donc attendu qu'une première itération de la description du système puisse nous donner, au minimum, le compartiment du flux élémentaire, soit quasiment le plus faible niveau de précision.

Possibilité de propager la caractérisation dans l'ICV

Il est possible de propager la caractérisation spatiale définie par ce mode à travers l'étape du calcul d'ICV. La propagation se fait par une subdivision de la matrice environnementale (**E**) (voir sous-section 2.4.2). Les ICVs actuels possèdent ce type de caractérisation. Toutes les caractéristiques spatiales de la description des systèmes se retrouvent telles quelles dans les ICVs avec le même niveau de précision. L'ICV possède donc une précision spatiale faible.

Utilité du format pour la modélisation des impacts environnementaux

La caractérisation spatiale offerte par ce mode est **nécessaire** à la modélisation des impacts environnementaux puisque les FCs des différentes méthodes dépendent de ces informations. En effet, les flux élémentaires ont des effets différents sur différentes catégories d'impact en fonction du compartiment et du sous-compartiment dans lesquels ils ont lieu.

Commentaires supplémentaires

Le format d'information utilisé pour la caractérisation spatiale avec le mode de caractérisation spatiale de flux élémentaires 1.0 n'est pas un standard de description de situation spatiale. Il devient alors difficile d'utiliser des sources d'information externes (non-ACV) pour la comparaison avec d'autres valeurs de flux élémentaires même si celles-ci sont caractérisées au niveau spatial puisque cette caractérisation risque de ne pas être conforme à celle des compartiments et sous-compartiments.

Résumé des aspects distinctifs de ce mode de caractérisation

L'inconvénient majeur du mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 1.0 se résume en un manque de précision dans la description spatiale qui laisse place à une modélisation de certains impacts environnementaux avec une incertitude potentielle de plusieurs ordres de grandeur. *La description spatiale offerte est cependant nécessaire à la modélisation en ACV et devra être conservée pour le mode de caractérisation qui sera choisi.*

Le lien structurel de la caractérisation spatiale qui lie directement un compartiment et sous-compartiment à un flux élémentaire spécifique est un aspect important pour la flexibilité de la modélisation du système. Cet aspect est encore plus important du fait que les caractéristiques spatiotemporelles des différents flux n'ont pas de correspondance imposée. Cette particularité du mode de caractérisation permet donc une agrégation plus ou moins grande des processus décrivant le système ce qui peut simplifier le travail de modélisation.

Evaluation du mode de caractérisation spatiale des processus 1.0

Ce deuxième mode de caractérisation spatiale est décrit en détail dans la sous-section 2.4.1 (page 2-21). Il se base sur les propositions de considérations spatiales en ACV provenant des travaux de Mutel *et al*. (2009; 2011). Plusieurs propositions de ce mode de caractérisation ont d'ailleurs été reprises dans le cadre du développement de la 3e version de la BDD ecoinvent (Weidema *et al*. 2012). Ce mode répond clairement aux lacunes de précision existantes dans le mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 1.0.

Ce mode se distingue lui aussi par le format de la caractérisation spatiale et par les liens créés entre la caractérisation et la structure de modélisation des systèmes.

Le format de description spatiale de ce mode utilise une segmentation/partition par région (voir tableau 2-4, page 2-21) il s'agit donc d'une caractérisation géographique. La région peut être de dimension variable allant du continent à un point géographique défini par des coordonnées latitude/longitude. A titre d'exemple, il est possible d'indiquer qu'un processus de production d'eau chaude sanitaire se situe à Sophia Antipolis avec ce mode de caractérisation si le périmètre de cette région est défini.

La caractérisation spatiale de ce mode s'applique au processus et s'applique donc de manière équivalente à tous les flux élémentaires de ce même processus. Par exemple, tous les flux élémentaires reliés à un processus décrivant la production d'électricité par une centrale au charbon en France auront une caractérisation spatiale équivalente à la superficie de la France. L'équivalence dans la caractérisation spatiale des flux élémentaires force certaines conditions qu'il faut considérer lors de l'analyse de la pertinence du mode face au cadre d'évaluation choisi.

Evaluation selon les critères de performance

Les publications décrivant ce mode (Mutel and Hellweg 2009; Weidema *et al*. 2012) n'expliquent pas le choix d'une caractérisation par processus, mais bien comment la définir. Il est donc pertinent de faire cette analyse pour évaluer l'utilité du développement méthodologique de l'ACV lié à ce mode.

Critère 1 : minimiser le temps de travail

Recherche d'informations

Le temps de travail pour la recherche d'informations sur la spatialité des systèmes augmente pour deux raisons dans le cas d'une caractérisation spatiale par processus. Tout d'abord, la recherche d'une information plus précise risque d'être plus longue que l'identification des compartiments et sous-compartiments de flux élémentaires. L'utilité d'un plus haut niveau de précision spatiale lors de l'analyse et de la modélisation des impacts environnementaux vient toutefois pallier à cet effort supplémentaire. C'est toutefois la deuxième raison de l'augmentation du temps nécessaire à la recherche d'information qui semble problématique puisqu'il faudrait l'éviter.

Tel que mentionné dans la sous-section 2.4.1, ce mode de caractérisation favorise la transparence lors de la modélisation du système à cause du lien entre la caractérisation spatiale et le processus. La structure du mode de caractérisation guide donc vers l'utilisation de processus de plus en plus élémentaires pour augmenter le niveau de précision spatiale. En opposition, l'utilisation de processus agrégés est en lien avec un faible niveau de précision spatiale. En effet, des processus agrégés peuvent regrouper plusieurs processus élémentaires, donc des flux élémentaires reliés à différentes spatialités. Comme le processus agrégé regroupe toutes ces spatialités, le niveau de précision maximale de celui-ci doit être équivalent à une région qui englobe les spatialités de tous les flux. Un processus agrégé décrivant la totalité de la chaîne de production (de l'extraction à la mise sur le marché) du cuivre est un bon exemple de processus où la segmentation au niveau de la région correspondra à une précision très faible au niveau spatial puisque l'extraction ne se fait pas dans le pays de mise en marché.

Il existe cependant plusieurs BDDs (GaBi, ELCD, ecoinvent…) qui utilisent ce type de processus pour plusieurs raisons. L'utilisation du mode de caractérisation spatiale des processus vient donc minimiser la possibilité d'utilisation des processus agrégés puisqu'ils ne pourront offrir un haut niveau de précision équivalent. C'est donc la perte d'interopérabilité avec les BDDs qui n'utilisent pas ce mode de caractérisation qui risque d'augmenter le temps de travail pour la recherche d'informations.

Définition des fiches de données

Le lien entre la caractérisation spatiale et la définition d'un processus réduit la quantité d'information à inclure dans la description spatiale d'une fiche de données puisqu'il n'est pas nécessaire de renseigner la spatialité de chaque flux élémentaire. Cette réduction dans la quantité d'information à définir réduit le temps de travail pour la création d'une fiche de données. La description spatiale requiert cependant des connaissances plus poussées en géographie et en informatique.

Modélisation des systèmes

La recherche d'une plus grande précision sur la caractérisation spatiale des flux mène vers une augmentation du travail lors de la modélisation des systèmes. En effet, l'augmentation de précision spatiale sur les flux élémentaires s'applique aussi au processus et il devient alors nécessaire de subdiviser des processus représentant une moyenne régionale pour modéliser ce système avec précision. La production d'électricité pour un pays est un bon exemple de cette situation. Si le niveau de précision recherché est de la taille du pays, il est alors possible de définir tous les flux élémentaires dans un processus. Cependant, si la précision spatiale recherchée est de la taille d'un sous-bassin versant, il faut définir des processus différents pour chacun de sous-bassin versant de ce pays. Ce cas de figure a clairement été envisagé par les créateurs de la 3e version d'ecoinvent comme l'indique la nouvelle définition de processus parents et enfants (Weidema *et al*. 2012). Il faudra donc créer une multitude de fiches de données pour décrire tous les processus élémentaires d'une chaîne de production. Ce temps supplémentaire peut être minime si une précision supplémentaire ne requiert pas une modification de tous les champs d'une fiche de données, mais bien seulement une modification du champ de caractérisation spatiale.

Analyse des résultats et des systèmes

Le mode de caractérisation des processus est lié à la proposition de Mutel et Hellweg (2009). La caractérisation spatiale des ICVs et des impacts environnementaux calculés à partir d'informations utilisant ce mode de caractérisation n'offre pas d'information supplémentaire par rapport à des résultats d'une étude ACV standard (utilisant le mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires). Le temps de travail pour l'analyse de la spatialité des résultats et des systèmes modélisés est donc comparable à celui de la méthode ACV standard puisqu'il faut retourner à l'information servant à modéliser les systèmes pour faire cette analyse spatiale.

Critère 2 : potentiel de précision

Description des systèmes

Le format de caractérisation de ce mode permet un fort potentiel de précision pour la description de la spatialité d'un système. Une coordonnée latitude/longitude avec une description de 4 chiffres après la virgule peut en fait offrir une précision de l'ordre d'environ 11 m (à l'équateur). Il est même possible d'ajouter une information sur l'altitude si ce type d'information devient nécessaire pour l'analyse ou la modélisation du système.

Une description de système aussi précise mène à une grande transparence dans la modélisation. La transparence est ici reliée à la possibilité d'obtenir une information supplémentaire sur un processus en fonction de sa caractérisation spatiale. Un processus de production d'électricité caractérisé par des coordonnées latitude/longitude pourrait, par exemple, être associé à une centrale hydroélectrique spécifique. Il s'agit cependant d'un exemple qui indique aussi qu'une précision aussi fine n'est potentiellement pas représentative au niveau des flux élémentaires. En effet, ce mode de caractérisation lie tous les flux à la spatialité du processus et cette situation peut poser problème pour des infrastructures possédant une superficie supérieure à la précision de la caractérisation. En reprenant l'exemple de la centrale hydroélectrique, il devient évident que les flux élémentaires peuvent être situés à l'extérieur de la région définie par des coordonnées latitude/longitude qui offriraient une précision de l'ordre de la dizaine de mètres. Il faudra donc porter une attention particulière aux dimensions des infrastructures reliées à un processus pour limiter la précision de la spatialité de ce processus afin de rester représentatif lors de la modélisation de systèmes.

La recherche d'un haut niveau de précision pour ce mode de caractérisation spatiale augmente la difficulté de l'utilisation de données confidentielles. Par exemple, un processus, qui décrit la fabrication d'éoliennes dans une ville précise, sera automatiquement relié aux données de la compagnie ayant ses activités dans cette ville. Il semble alors possible que ce mode de caractérisation inquiète les partenaires industriels qui possèdent normalement les données les plus représentatives sur les quantités de flux à définir pour un processus spécifique. *Le mode de caractérisation spatiale des processus doit donc être lié à un risque de diminution de la représentativité des valeurs utilisées pour la modélisation des systèmes*. Favoriser la transparence et la précision avec une diminution du potentiel d'utilisation de données représentative n'est pas considéré comme une option intéressante dans le cadre de cette thèse. En effet, l'objectif général qui mène à proposer des développements méthodologiques pour une meilleure considération des spécificités spatiotemporelles s'explique par la recherche d'une plus grande représentativité de la modélisation ACV. Une solution qui augmente la représentativité spatiotemporelle en prenant le risque de diminuer la représentativité de la description des systèmes n'est donc pas un choix optimal.

Modélisation des impacts environnementaux

A titre d'exemple, ce mode pourrait permettre une précision de l'ordre de la dizaine de mètres. Ce niveau de précision est suffisant même pour faire des analyses d'impact très localisé comme l'évaluation de la pollution sonore qui est aujourd'hui vue comme une des catégories qui nécessiteront un très haut niveau de précision spatiale (Sonnemann *et al*. 2011). Ce mode de caractérisation semble donc offrir un potentiel de précision spatiale supérieur à la quasi-totalité des besoins des futures méthodes de modélisation d'impacts environnementaux dans le cadre d'une ACV.

Toutefois, la variabilité spatiale des impacts environnementaux dépend du type de catégories d'impact et du type de flux élémentaire concerné. Ce qui veut dire qu'un niveau équivalent de précision spatiale n'est pas utile pour tous les flux élémentaires. L'émissions de CO_2 dans l'air est un exemple de flux élémentaire qui ne nécessite pas un haut niveau de précision spatiale puisque ce gaz a une longue persistance (temps de résidence) dans l'atmosphère ce qui lui confère un effet global sur le réchauffement climatique puisqu'il a le temps de se distribuer quasi-uniformément dans l'atmosphère. Il serait dans ce cas, inutile de procéder à une caractérisation spatiale très précise du processus qui est lié seulement à ce type de flux élémentaire. Il n'existe cependant que très peu de processus qui soient reliés à un seul type de flux élémentaire. Il devient donc important de se référer à la précision spatiale de la caractérisation d'un processus qui correspond au plus haut niveau de précision nécessaire à la modélisation d'impacts environnementaux reliée à un des flux élémentaires de ce processus.

Un besoin très élevé en précision spatiale pour la modélisation d'impact dans un ACV spécifique pourrait entrer en conflit avec la limite de précision spatiale identifiée précédemment. L'exemple de la centrale hydroélectrique peut être réutilisé pour expliquer ce problème. Admettons qu'un flux élémentaire dans l'eau provienne de la production d'électricité de cette centrale, mais que celui-ci ait lieu dans deux cours d'eau différents. Si la réaction des deux cours d'eau est très différente face à ce flux élémentaire, la modélisation des impacts environnementaux devrait dans le meilleur des cas, considérer cette différence. Cependant, les flux élémentaires auront la même spatialité ce qui empêchera la différenciation des effets. Pour arriver à une différentiation, il faudrait diviser la centrale en sections reliées aux différents cours d'eau. Il faut souligner que ce niveau de détail est plus facilement lié à une analyse de risque. Néanmoins, ce niveau de distinction pourrait permettre de différencier différents scénarios d'ACV ayant des impacts environnementaux quasi équivalents.

Vérification des conditions de viabilité

Capacité de gestion d'une précision variable – Méthode itérative

Il existe une multitude de possibilités pour la définition de régions avec le format utilisé par ce mode de caractérisation. Il est donc très simple de commencer la description d'un système avec une spatialité grossière pour ensuite augmenter la précision en sous-divisant le processus parent en processus enfants qui se définissent par des superficies réduites. Ce mode convient donc absolument à la condition d'une capacité de gestion d'une caractérisation avec une précision variable.

Possibilité de propager la caractérisation dans l'ICV

Le mode de caractérisation spatiale des processus proposé par Mutel et Hellweg (2009) ne peut être utilisé strictement pour obtenir un ICV caractérisé au niveau spatial. Il n'est donc pas possible d'obtenir un haut niveau de précision sur la spatialité des flux élémentaires définis dans un ICV avec ce mode de caractérisation. Il existe cependant une méthode pour propager la caractérisation spatiale de ce mode lors de l'étape de modélisation des impacts environnementaux.

Utilité du format pour la modélisation des impacts environnementaux

La caractérisation spatiale sera beaucoup plus précise que nécessaire pour certains des flux élémentaires. Cette précision pourrait ne pas correspondre à celle des méthodes de modélisation des impacts environnementaux et nécessitera donc un outil de conversion de la situation spatiale pour chaque type d'impact. Il existe déjà une solution à ce problème de non-correspondance entre le maillage des régions des données de modélisation des systèmes et le maillage des méthodes de modélisation d'impacts (Mutel et al. 2011). Il ne s'agit donc pas d'une difficulté importante dans le développement de la méthode. Toutefois, cette solution repose sur des hypothèses importantes qu'il faut considérer dans les résultats (voir discussion de la sous-section 5.2.3).

Commentaires supplémentaires

Le format choisi pour la définition des régions est le format KML. Il s'agit du format de description géographique lié à l'application « google map ». La popularité de cette application mène à une utilisation plus fréquente du format KML au sein des bases de données nécessitant une description géographique. Ce choix semble donc aujourd'hui judicieux pour simplifier le partage d'information entre différentes sources d'information qui pourrait être utile à la modélisation en ACV tant au niveau de la description d'un système que pour l'étape de la modélisation des impacts.

Résumé des aspects distinctifs de ce mode de caractérisation

Le format de caractérisation spatiale de ce mode permet d'obtenir une information beaucoup plus précise sur la spatialité du système que la caractérisation du mode des flux élémentaires 1.0. Il est aussi possible de gérer des précisions variables de la caractérisation en utilisant différents types et tailles de régions. Il est supposé que cette nouvelle description spatiale sera utile pour améliorer la représentativité des résultats de la modélisation d'impact même si aucune méthode de modélisation des impacts environnementaux existante ne peut tirer actuellement profit du niveau de précision potentiel de ce mode.

Les liens établis, par ce mode, entre la caractérisation spatiale et les processus d'un système imposent certaines conditions importantes lors de son utilisation. En effet, la caractérisation spatiale se fait au niveau du processus et les flux élémentaires relatifs à ce processus possèdent tous la même précision spatiale. Une recherche d'une plus grande précision dans la modélisation des impacts environnementaux requiert donc une plus grande précision dans la caractérisation spatiale des processus et suppose alors une plus grande transparence dans la modélisation du système. Cependant, cette spécificité diminue le potentiel d'agrégation de l'information et donc de l'utilisation de données confidentielles. L'augmentation de la difficulté d'intégration de données confidentielles peut donc minimiser la possibilité d'utiliser des données plus représentatives pour décrire les flux d'un processus. Ce mode n'amène donc pas seulement des modifications méthodologiques qui favorisent une augmentation de la représentativité de la modélisation ACV.

Comparaison des modes de caractérisation spatiale existants

Un résumé comparatif permet de bien identifier les avantages et inconvénients de l'utilisation des modes de caractérisation spatiales existants. Le tableau 4-1 résume les avantages et inconvénients des différents modes en fonction des critères et conditions du cadre d'évaluation.

Tableau 4-1 : Comparaison des différents modes de caractérisation spatiale selon les critères et conditions du cadre d'évaluation de la pertinence des modes de caractérisation

		Flux élémentaire 1.0 (référence)	Processus 1.0 (Mutel et Hellweg)
Critères de performance	Minimiser le temps de travail	*Temps de référence*	*Augmentation importante* Information plus difficile à obtenir Complexifie la modélisation du système
	Potentiel de précision	*Faible potentiel* Niveau de référence	*Haut potentiel* Le format de l'information permet une très grande précision
Conditions de viabilité	Gestion d'une précision variable - Méthode itérative -	*Non*	*Oui*
	Propagation de la caractérisation à l'ICV	*Oui*	*Non*
	Utilité pour la modélisation des impacts	*Oui* *(Nécessaire)*	*Oui* *(avec certains ajustements)*

La comparaison des modes de caractérisation présentée dans le tableau 4-1 identifie clairement qu'aucun des modes de caractérisation existants ne répond aux 3 conditions de viabilité proposées dans la sous-section 4.1.2. Il existe toutefois des solutions pour régler ces inconvénients :

- Il ne faut pas se limiter aux compartiments et sous-compartiments déjà existants, mais ajouter des sous-compartiments décrivant des régions qui correspondent aux maillages des méthodes de modélisation des impacts environnementaux.
- Quelques ajustements devront être faits sur la définition des éléments du calcul d'ICV pour que la caractérisation spatiale définie avec le mode de caractérisation des processus puisse propager son information à un ICV (voir annexe 7)

Il reste que le mode de caractérisation des flux élémentaires 1.0 est moins performant pour son potentiel de précision de la caractérisation à cause du format d'information utilisé. En contrepartie, le mode de caractérisation spatiale des processus, qui est très performant au niveau du potentiel de précision de sa caractérisation, est moins flexible et requiert donc probablement une augmentation plus importante[i] du temps de travail dans les études qui considèrent les spécificités spatiales. Le manque de flexibilité provient du lien établi entre la caractérisation spatiale et le processus plutôt que directement avec les flux élémentaires. L'avantage de la performance d'un mode est donc l'inconvénient pour la performance de l'autre.

Discussion générale sur la caractérisation spatiale

Un avantage non négligeable des modes de caractérisation spatiale existants provient du niveau d'acceptation de ceux-ci par la communauté de l'ACV. Il semble en effet que, malgré un manque notable de discussion sur les différentes possibilités à envisager, les modes retenus aujourd'hui sont acceptés et intégrés dans les BDDs du domaine. Ce commentaire n'indique pas que l'auteur ne voit pas de pertinence aux modes existants, mais qu'il est surprenant qu'une acceptation aussi généralisée ait eu lieu sans laisser de traces de débat. Cette surprise provient surtout des difficultés potentielles reliées à ces choix sur l'avenir de la méthode ACV. En effet, les solutions choisies peuvent amener plusieurs conditions et restrictions sur le format des définitions de processus lors de la construction des BDDs. La discussion de cette sous-section a tenté de souligner l'importance de ces restrictions et conditions.

L'utilisation d'une caractérisation spatiale des flux élémentaires doit permettre, lors du développement des logiciels de gestion de BDDs, qu'une liste restrictive de régions soit rendue disponible en fonction du type de substance et des impacts qui y sont reliés. Cette liste restrictive serait basée sur la méthode de modélisation des impacts qui sera choisie pour l'analyse ce qui définirait la taille des régions qui permet d'utiliser un FC approprié avec une faible variabilité spatiale. Cette proposition serait encore plus intéressante si un accord se fait dans la communauté sur les régions à utiliser pour toutes les méthodes de modélisation des impacts environnementaux. Ce type de liste pourrait simplifier le travail de caractérisation spatiale puisqu'il est plus simple d'identifier une information au sein d'une liste que de proposer une nouvelle information. Il faut aussi noter que ce type de liste restrictive ne pourrait être utilisé si la caractérisation spatiale se fait sur les processus puisque la taille des régions n'est plus en lien avec la modélisation des impacts environnementaux, mais plutôt en lien avec les connaissances des spécificités du système modélisé.

[i] Rappelons que nous faisons l'hypothèse que toutes études ACV, qui considèrent les spécificités spatiotemporelles, nécessitent une augmentation du temps de travail par rapport aux études ACV contemporaines.

Aujourd'hui, la précision « nécessaire » pour la caractérisation spatiale reste compliquée à identifié puisqu'il n'y a que peu de discussion sur le niveau de détail utile pour la modélisation des impacts environnementaux. Ce niveau de précision spatiale « nécessaire » doit dépendre d'une évaluation de ce qu'est un FC faiblement variable. Ce qui revient à dire que le développement de la caractérisation spatiale ne doit pas seulement toucher les modes, mais aussi les méthodes de modélisation des impacts. Ce travail est commencé, mais limité ce qui indique qu'une plus grande synergie du travail entre les spécialistes de BDDs et les spécialistes des méthodes de modélisation est souhaitable pour obtenir une bonne connexion entre l'étape de modélisation des systèmes et la phase de modélisation des impacts environnementaux.

Une dernière observation doit être soulignée, à ce stade, face à la nouvelle proposition de caractérisation d'ecoinvent. En effet, rien n'indique que les régions actuellement disponibles ont été choisies en fonction d'une homogénéité dans la réaction de l'environnement face à des flux élémentaires. Autrement dit, les nouvelles régions définies n'aideront pas nécessairement à faire une modélisation plus représentative des impacts environnementaux puisque les régions définies peuvent être très variables dans leur interaction avec les émissions de différentes substances. L'exemple d'un pays comme la France, où les écoulements dans l'eau peuvent se faire au sein de plusieurs types de bassin versant, explique bien cette situation. Il semble donc, pour l'instant, que la caractérisation spatiale soit plutôt utile à l'analyse de scénario et système où une description au niveau spatial peut être utile. Il faut ensuite noter qu'il n'y a pas de description de l'altitude des flux élémentaires qui peut être également utile à une modélisation plus représentative des impacts environnementaux.

4.2.2 Evaluation d'un mode de caractérisation temporelle

Il a été possible de construire un mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires 1.0 à partir de la structure proposée par Heijungs et Suh (2002) et le format proposé par Levasseur et al. (2010). La description des concepts touchant les liens établis pour la caractérisation et le format d'information utilisé est détaillée dans la sous-section 2.4.1 (page 2-22). L'évaluation de la pertinence de ce mode de caractérisation temporelle est effectuée pour vérifier s'il répond bien aux besoins de développements identifiés dans le chapitre 3.

Evaluation du mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires 1.0

L'évaluation de ce mode de caractérisation à partir du cadre défini dans la section 4.1 est difficile à accomplir à partir de la brève description offerte dans la sous-section 2.4.1. Il faut donc, pour accomplir cette évaluation, décrire en détail les caractéristiques des distributions temporelles que Levasseur et al. (2010) proposent d'utiliser. Cette description se base sur une interprétation des propos de la publication. Il faut aussi rappeler que chaque distribution temporelle est en lien avec un flux élémentaire particulier.

Description détaillée du format des distributions temporelles

Les distributions temporelles utilisées dans ce mode de caractérisation doivent respecter plusieurs conditions. Ces conditions permettent de s'assurer de l'utilité de l'information qui sera transférée dans l'inventaire pour être utilisée pendant l'étape de modélisation des impacts et l'étape d'interprétation des résultats.

La figure 4.1 décrit les aspects importants du format des distributions utilisées pour la caractérisation temporelle d'un flux pour le mode de caractérisation temporelle simple.

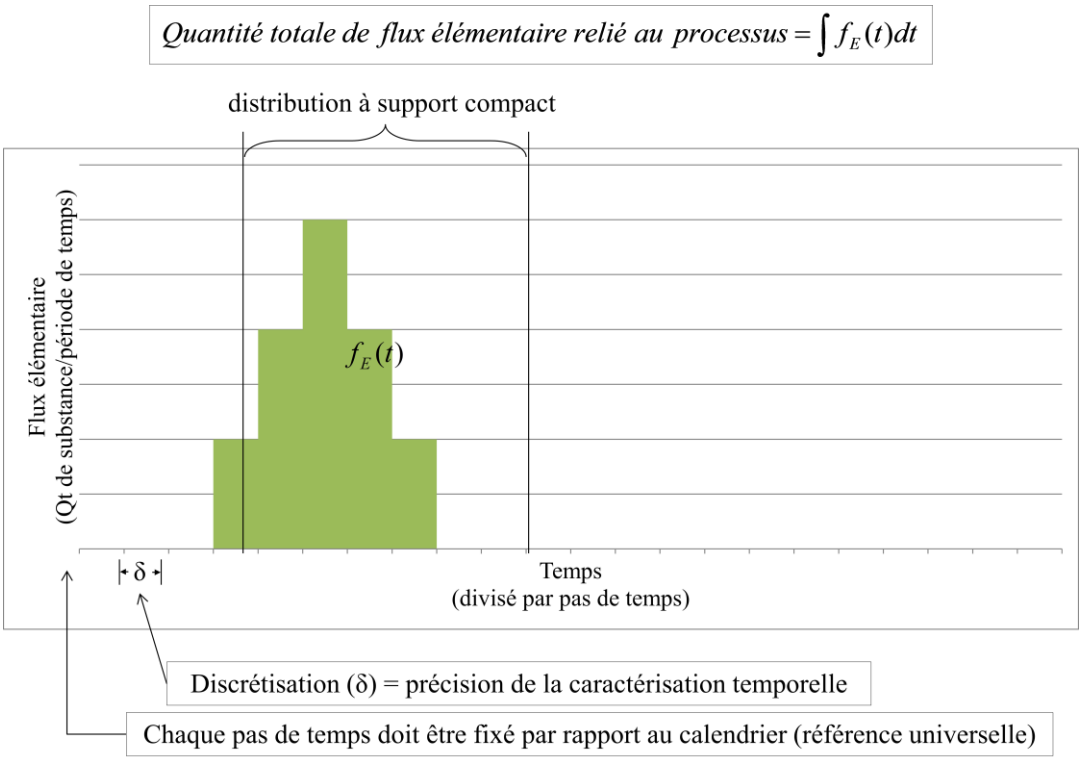


Figure 4.1 : Description du format d'une distribution temporelle pour le mode de caractérisation temporelle simple applicable aux flux élémentaires

Le niveau de précision de la caractérisation temporelle est, dans ce cas, donné par le pas de temps (discrétisation) de la distribution temporelle. Il est possible d'utiliser une précision annuelle, mensuelle ou journalière sans trop de difficultés et cette précision peut varier entre les différents flux élémentaires décrits dans la fiche de données. Si l'analyste responsable de la modélisation possède une information sur le flux élémentaire annuel relié au processus, le pas de temps sera donc annuel. Si l'information n'est pas disponible, il faudra prendre un pas de temps plus grand ou égal à la période nécessaire pour accomplir le processus. Dans le cas de la caractérisation temporelle des flux élémentaires, le pas de temps de la période choisie doit, théoriquement, correspondre au niveau de précision nécessaire pour la modélisation des impacts environnementaux. Ce niveau de précision n'est cependant pas déterminé pour la majorité catégories d'impacts et il est donc, aujourd'hui, difficile de définir tous les pas de temps qui devraient être utilisées.

Il faut aussi que la distribution définisse le moment où le flux élémentaire débute dans le cycle de vie du système modélisé. La définition de ce moment peut aussi varier en précision. La précision devrait, dans ce cas, être équivalente à la précision du pas de temps pour simplifier la définition de la distribution. Une distribution définie par un pas de temps annuel devrait donc être définie avec l'année de commencement.

La distribution est une représentation d'une mesure. Elle doit alors être définie sur un support compact et être localement intégrable. Il semble d'ailleurs impossible de trouver un processus qui est relié à un flux élémentaire infini dans le temps. Il n'est cependant pas interdit par cette condition que des flux élémentaires puissent être interrompus pendant une ou plusieurs périodes sur le domaine temporel de la distribution.

La distribution sert à répartir, dans le temps, la totalité d'un flux élémentaire relié à un processus. L'intégrale de la distribution sur le domaine compact doit alors être équivalente à la valeur totale du flux élémentaire relié à un processus. Cette condition est surtout utile à des fins de vérification de la correspondance entre des systèmes non caractérisés au niveau temporel.

Evaluation selon les critères de performance

Critère 1 : minimiser le temps de travail

La recherche d'informations

Le temps de récolte de données sera obligatoirement augmenté par une caractérisation temporelle puisqu'elle n'est pas requise par la méthode ACV standard. Il faut, dans ce cas, que l'analyste responsable de la modélisation du système trouve des informations supplémentaires pour la décrire. La variabilité sur le temps de recherche dépend, encore une fois, du niveau de précision nécessaire. Il faut souligner que la quantité d'information additionnelle est proportionnellement faible par rapport à toute l'information recherchée pour la description d'un processus.

Définition des fiches de données

Le format d'une distribution temporelle est un concept plus complexe à utiliser qu'une valeur numérique simple. Ce mode de caractérisation demande donc un effort supplémentaire et des connaissances plus poussées au niveau mathématique pour les analystes responsables de la modélisation des systèmes. Il faut donc souligner que ce mode de caractérisation réduit la simplicité de création de fiches de données et pourrait, à court terme, compliquer la création de BDD.

Le mode de caractérisation temporelle proposé ici n'amène que peu de contraintes dans la définition des fiches de données servant à décrire différents processus. Les limites de ce qui entre dans la fiche de données permettent aussi d'utiliser des processus avec un niveau d'agrégation variable puisque les temporalités des flux élémentaires ne doivent pas nécessairement être équivalentes entre elles. Cette situation confère une grande flexibilité dans la définition des fiches de données. Le mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires est encore plus flexible puisque l'information peut varier en précision.

Modélisation des systèmes

Le niveau de flexibilité pour la modélisation du système est équivalent à celui du mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 1.0. Cependant, le temps de travail pour la modélisation d'un système sera beaucoup plus important parce que le nombre de réutilisations de processus, au sein de différents scénarios et même au sein d'un même système, sera grandement réduit. Il sera en effet, quasi-impossible qu'un processus est lieu exactement selon la même temporalité pour deux études ou dans une même chaine de production. Il s'agit en fait du problème, soulevé dans l'analyse générale de la caractérisation spatiale qui explique que la généricité d'un processus diminue en fonction de l'ajout de caractéristiques. Il faudra donc définir des temporalités différentes pour la quasi-totalité des processus d'un système à chaque scénario. Considérant le nombre élevé (quelques milliers) de processus qui sont normalement nécessaires à la description d'un système dans une modélisation ACV, cette situation cause un problème important dans la quantité de travail qui sera nécessaire afin de considérer la temporalité des systèmes. Cette analyse vient en fait confirmer les propos de Heijungs et Suh (2002).

Analyse des résultats et des systèmes

Les publications sur la modélisation dynamique des systèmes et celles sur la modélisation dynamique des impacts sont les seuls exemples d'étude ACV qui permettrait l'évaluation du temps de travail nécessaire à la considération des spécificités temporelles dans ces étapes. Il n'y a cependant pas de discussion à ce niveau. Cette information semble pourtant utile pour faciliter les phases d'analyse en offrant une information décrite avec un nouveau niveau de détail.

Critère 2 : potentiel de précision

Description des systèmes

Il est difficile de commenter sur une augmentation de la précision de la caractérisation temporelle lors de la modélisation des systèmes parce que ce genre d'information est négligé dans les ACV standards. Il faut cependant souligner que le pas de temps d'une distribution temporelle peut être très court si l'information sur les flux élémentaires le permet. Il ne semble donc pas y avoir de limite à la précision de la caractérisation temporelle avec ce mode. Comme pour le mode de caractérisation spatiale des processus 1.0, le niveau de précision optimal devrait être en lien avec une période de temps ou un FC (qui dépend du temps) varie de manière négligeable.

Modélisation des impacts environnementaux

Le potentiel d'augmentation de la précision des résultats d'un ACV considérant la temporalité des scénarios est aujourd'hui hypothétique. Les quelques études ayant porté sur ce sujet (voir sous-section 0) indiquent bien que certains facteurs de caractérisation varient de manière importante en fonction du moment où les flux élémentaires ont lieu. Il existe aussi quelques cas d'études qui présentent des scénarios où la considération de la temporalité a amené une modification des conclusions d'une ACV.

Vérification des conditions de viabilité

Capacité de gestion d'une précision variable – Méthode itérative

Le format des distributions temporelles retenu peut être utilisé avec n'importe quel pas de temps (niveau de discrétisation). Il est donc possible de faire des caractérisations temporelles avec différents niveaux de précision. Le niveau de précision peut même varier entre les différents flux élémentaires. Cette condition est donc respectée pour le mode de caractérisation simple.

Possibilité de propager la caractérisation dans l'ICV

Ce mode de caractérisation utilise des liens avec les flux élémentaires. Ce type de lien permet une propagation de n'importe quel type d'information vers l'ICV comme le démontre la propagation de l'information sur les compartiments et sous-compartiments pour la caractérisation spatiale. Il faut cependant noter que cette propagation se fait seulement si la forme de la distribution est dissociée des valeurs utilisées dans les matrices d'entrée du calcul. L'annexe 8 décrit comment retrouver la forme de la distribution une fois que le calcul de l'ICV est terminé.

Utilité du format pour la modélisation des impacts environnementaux

La distribution a été choisie comme format puisqu'il s'agit du format qui est nécessaire à la modélisation des impacts pour la seule méthode dynamique existante à ce jour. Le format est donc pertinent pour cette méthode. Il semble logique que d'autres méthodes puissent utiliser des FCs spécifiques pour certaines périodes et que le format de la distribution reste utile pour ces nouvelles méthodes. Le développement de nouvelles méthodes de modélisation dynamique d'impacts environnementaux ne fait cependant pas partie du cadre de développement de ce document.

Résumé des aspects distinctifs de ce mode de caractérisation

Le format proposé de distributions permet la gestion de caractérisation temporelle avec des précisions variables pour différents flux élémentaires et est utile à la modélisation dynamique d'impacts environnementaux. Ce format correspond donc très bien aux différents critères et conditions fixés pour le développement des modes de caractérisation.

La spécificité de la caractérisation temporelle d'un processus mène vers un problème conséquent au niveau de la quantité de travail nécessaire pour des ACV considérant cet aspect. Le problème provient du référencement temporel par rapport au cycle de vie du scénario. Ce qui veut dire qu'un processus caractérisé au niveau temporel n'est valide que pour un scénario spécifique. Il faudra donc modéliser tous les processus pour chaque étude ACV possédant des cycles de vie et système différents. En fait, ce problème rend toutes les BDDs actuelles inutiles pour un ACV considérant l'aspect temporel ce qui, en pratique, rend impossible la considération temporelle en ACV. Il faut donc trouver une solution à ce problème.

Résumé de l'analyse du mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires 1.0

Le tableau 4-2 présente un résumé de l'analyse du de caractérisation temporelle des flux élémentaires 1.0 avec la même structure que le tableau 4-1.

Tableau 4-2 : Résumé de l'évaluation du mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires selon les critères et conditions du cadre d'évaluation de la pertinence des modes de caractérisation

		Flux élémentaire 1.0
Critères de performance	Minimiser le temps de travail	*Inverse (augmentation)* - Description complète de tous les scénarios - Perte d'utilité des BDDs
	Potentiel de précision	*Haut potentiel*
Conditions de viabilité	Gestion d'une précision variable - Méthode itérative -	Oui
	Propagation de la caractérisation à l'ICV	Oui
	Utilité pour la modélisation des impacts	Oui

Le résumé du tableau 4-2 permet d'identifier visuellement que le mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires 1.0 ne possède qu'un seul inconvénient relatif à la perte de généricité des processus d'une BDD. Cet inconvénient est toutefois critique à la viabilité de la méthode ACV. En effet, la perte de l'utilité des BDDs est un grave inconvénient puisqu'il réduit à néant la possibilité de faire des études ACV avec un haut niveau de complétude sans devoir investir des années de travail pour une personne.

4.3 Proposition de nouveaux modes de caractérisation spatiotemporelle

L'évaluation de la pertinence des modes de caractérisation spatiale et temporelle existants présentée à la section 4.2 permet d'identifier des avantages et inconvénients dans l'utilisation de chacun de ces modes. Quatre inconvénients identifiés sont toutefois décisifs pour en arriver à la conclusion qu'il est opportun de proposer des modes de caractérisation plus performants.

1. Les régions actuellement définies par le mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 1.0 n'offrent pas un haut potentiel de précision ;
2. Le mode de caractérisation spatiale des processus 1.0 risque d'augmenter le travail de recherche d'informations et de modélisation des systèmes à cause du lien imposé entre les processus et les caractéristiques spatiales ;
3. L'augmentation de la précision de la caractérisation spatiale peut se faire aux dépens de la représentativité de la modélisation ACV si le mode de caractérisation spatiale des processus 1.0 est utilisé ;
4. Le temps de travail nécessaire pour la modélisation des scénarios et systèmes risque d'être trop significatif si le mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires 1.0 est utilisé.

De nouveaux modes sont donc proposés afin de faire disparaître, ou au minimum diminuer, ces inconvénients. Cette section présente donc un nouveau mode de caractérisation spatiale et un nouveau mode de caractérisation temporelle qui répondent mieux aux critères du cadre d'évaluation.

4.3.1 Proposition d'un mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 2.0

La comparaison des différents modes de caractérisation spatiale existants (tableau 4-1) a permis d'identifier qu'il est plus intéressant d'effectuer une caractérisation des flux élémentaires pour favoriser le potentiel de représentativité des valeurs utilisées pour la modélisation ACV. Le mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 1.0 laisse aussi place à un partage plus simple des informations entre les BDDs qui utilisent différents niveaux d'agrégation lors de la définition des processus.

Le plus grand potentiel de précision spatiale du mode de caractérisation des processus 1.0 n'est pas relié aux liens établis entre les processus et les caractéristiques spatiales, mais bien au format utilisé. Puisque ce format n'est pas strictement relié à un mode de caractérisation, il devient intéressant de proposer un transfert de ce format vers le mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 1.0.

La création de ce troisième mode a comme objectif de tirer profit de la flexibilité offerte par le mode de caractérisation des flux élémentaires 1.0 et du potentiel de précision offert par le mode de caractérisation des processus 1.0.

Il est nommé, mode de caractérisation des flux élémentaires 2.0. Sa description et son évaluation à partir du cadre d'évaluation de la pertinence sont présentées dans les paragraphes suivants.

Description du mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 2.0

Une nouvelle plage de caractérisation spatiale doit être ajoutée pour caractériser tous les flux élémentaires décrits dans une fiche de donnée. Il s'agit du changement majeur de ce nouveau mode par rapport au mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 1.0. Cette information est en supplément de la caractérisation spatiale par compartiment et sous-compartiment puisque ces caractéristiques restent nécessaires à la modélisation des impacts environnementaux.

Le format de description des régions pour les différents flux élémentaires reprend le format utilisé dans le mode de caractérisation spatiale des processus (voir tableau 2-4, page 2-21). Un exemple de fiche de données utilisant ce mode de caractérisation est proposé à l'annexe 9.

La caractérisation spatiale des processus par région qui est proposée par le mode de caractérisation des processus 1.0 est conservée, mais cette information ne sert plus à l'étape de la modélisation des impacts. Elle sert plutôt comme balise d'identification du processus. Cette balise permet de choisir le processus le plus représentatif de la spatialité lors de la modélisation d'un système. La caractérisation spatiale des processus peut aussi être utile pour le partage d'information entre BDDs et pour l'analyse du système.

Analyse selon les critères de développement

Critère 1 : minimiser le temps de travail

Recherche d'informations

La recherche d'informations pour établir une caractérisation spatiale précise devrait être équivalente à celle nécessaire pour l'utilisation du mode de caractérisation des processus 1.0. Il sera donc attendu qu'un effort supplémentaire sera nécessaire pour la description des flux élémentaires avec ce mode de caractérisation, mais seulement parce que ce type d'information n'est pas renseigné dans la plupart des BDDs actuelles.

Définition des fiches de données

Une plage d'information supplémentaire devra être remplie pour chaque flux élémentaire d'un processus afin d'obtenir une information sur la région des flux élémentaires. Il y aura donc une augmentation du temps de travail pour définir les fiches de données par rapport aux deux modes de caractérisation spatiale existants. Encore une fois, ce temps de travail supplémentaire est probablement faible par rapport au travail de recherche d'informations et de création d'une fiche de données complète.

Modélisation des systèmes

Le mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 2.0 permet de définir les systèmes avec des structures équivalentes à celles utilisées aujourd'hui dans les BDDs. Les systèmes peuvent donc être décrits avec des processus agrégeant plus ou moins d'information (allant du processus élémentaire au processus systèmes). Le choix d'agrégation peut alors se faire en fonction des besoins identifiés par la personne responsable de la modélisation du système. Il ne semble donc pas que la modélisation de système avec ce mode de caractérisation requiert plus de temps de travail que la modélisation de systèmes liée au mode de caractérisation des flux élémentaires 1.0.

Analyse des résultats et des systèmes

La caractérisation spatiale sur les flux élémentaires et de processus liée au mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 2.0 permet d'obtenir une description très détaillée lors de l'analyse du système. Cette analyse est simplifiée par le fait que la caractérisation spatiale est rendue disponible dans l'ICV, dans la description des chaînes de production et potentiellement dans la description des impacts environnementaux.

Critère 2 : potentiel de précision

Description des systèmes

Ce nouveau mode de caractérisation permet d'obtenir un niveau équivalent de précision à celui du mode de caractérisation des processus puisqu'il utilise le même format de description spatiale. Une description des compartiments et sous-compartiments est aussi donnée pour chacun des flux élémentaires. La précision sur les compartiments et sous-compartiments n'est, quant à elle, pas modifiée.

Modélisation des impacts environnementaux

Les limites de précision ne sont plus fixées par la taille des infrastructures reliées aux processus puisque la caractérisation est liée aux flux élémentaires. Le maillage des régions de caractérisation des flux élémentaires peut donc être défini par une taille qui permet d'utiliser des FCs avec une faible variabilité spatiale. L'évaluation des dimensions de ce maillage ne fait toutefois pas partie du cadre de cette étude et devra être évaluée avec la participation des experts dans le domaine de la création de méthodes de modélisation des impacts environnementaux.

Vérification des conditions de viabilité

Capacité de gestion d'une précision variable – Méthode itérative

Cette condition est respectée au même niveau que le mode de caractérisation spatiale des processus le permet. Il est donc possible de gérer une grande variabilité de précision avec ce mode.

Possibilité de propager la caractérisation dans l'ICV

Le lien entre les caractéristiques spatiales et les flux élémentaires qui est utilisé par ce mode est de même nature que celui utilisé par le mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 1.0. Il est donc possible de faire propager la caractérisation spatiale de même manière dans l'ICV. Les flux élémentaires sont donc différentiés, non seulement en fonction des substances, mais aussi en fonction des régions.

Utilité du format pour la modélisation des impacts environnementaux

La caractérisation spatiale étant spécifique à chaque flux élémentaire, il est possible de choisir une région de taille correspondant à une faible variabilité de l'état de l'environnement recevant le flux. Donc, comme indiqué précédemment, la région de caractérisation des flux élémentaires peut avoir une taille permettant d'utiliser un FC avec une faible variabilité pour un certain maillage spatial. Si ce maillage optimal n'est pas utilisé à cause d'un manque de précision lors de la description du système, il est suggéré de prendre le FC de la région qui englobe la région de caractérisation du flux et de considérer la variabilité de l'impact provenant de cette incertitude sur la spatialité.

Résumé des aspects distinctifs de ce mode de caractérisation

Ce mode de caractérisation combine les avantages des deux modes existants (sous-section 4.2.1) et annule leurs plus importants inconvénients respectifs. Le potentiel de précision est donc accru de manière importante en utilisant le format du mode de caractérisation spatiale des processus 1.0 qui vient s'ajouter à celui des compartiments et sous-compartiments. Le lien direct et spécifique entre la caractérisation spatiale et un flux élémentaire permet ensuite une plus grande flexibilité dans la structure de modélisation du système ce qui permet d'utiliser les flux (de processus et élémentaires) représentatifs, qu'ils soient agrégés ou non.

Conclusions de l'évaluation

Ce nouveau mode de caractérisation spatiale possède un potentiel important de maximisation de la précision qui est en lien avec les besoins des méthodes de modélisation d'impacts environnementaux. Le mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 2.0 requiert une augmentation de la charge de travail pour la recherche d'informations sur la spatialité des systèmes, mais n'a pas le désavantage de complexifier la structure de modélisation de ces mêmes systèmes. Ces différentes observations nous mènent à la conclusion que :

Le mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 2.0 présente des avantages notables pour le développement des considérations spatiales dans la méthode ACV

C'est donc ce mode de caractérisation spatiale qui est retenu pour la suite des travaux de la thèse.

Finalement, il est important d'indiquer que le mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 2.0 est fonctionnel pour toutes les BDDs et améliore donc le potentiel de partage d'information. Cette capacité de partage reste importante pour diminuer le temps de travail lié à la modélisation des systèmes.

4.3.2 Proposition d'un mode de caractérisation temporelle relatif des flux

L'inconvénient majeur du mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires 1.0 est lié à la perte de généricité des processus constituant les BDDs. Il devient en effet difficile de définir des processus caractérisés au niveau temporel qui peuvent être réutilisés pour différents scénarios puisque leurs temporalités seront obligatoirement différentes.

L'hypothèse, pour remédier à ce problème, est qu'une définition d'une temporalité relative au processus plutôt que relative au cycle de vie du système permettrait, en partie, une résolution de ce problème de généricité. Pour arriver à définir une caractérisation temporelle relative, il faut définir la temporalité des flux de processus et des flux élémentaires par rapport à un moment fixé au processus plutôt que fixé sur le cycle de vie d'un scénario.

Ce repositionnement de la référence temporelle nécessite que tous les flux de processus soient représentés sous le format de distributions temporelles. Les distributions temporelles sont donc utilisées pour décrire tous les flux et peuvent être différentes en précision et dans leur domaine de temps.

Description détaillée du format de la caractérisation temporelle pour ce mode

Le format de distribution temporelle présenté pour le mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires 1.0 est repris, pour ce nouveau mode, et appliqué tant pour la description des flux élémentaires que pour les flux de processus avec une distinction importante sur le moment de référence. Ces distributions temporelles sont définies relativement à l'unité de modélisation de système qu'est le processus. Les distributions temporelles doivent donc être invariables par translation temporelle sur le domaine de validité de la définition du processus élémentaire.

Le positionnement de ce moment est arbitraire, mais doit être équivalent entre les différents processus des BDDs afin que l'appel des processus (par les flux de processus) et des flux élémentaires soit fait de manière homogène entre les sources d'information (BDDs). Ce moment de référence est arbitrairement fixé au temps où le processus rend son produit disponible. Ce moment est dorénavant appelé le temps 0. Le temps 0 d'un processus est le moment où il est possible d'utiliser son produit. C'est-à-dire qu'il peut soit être transporté à son site d'utilisation, soit utiliser au même site, mais pour un autre processus qui en dépend. On peut donc s'attendre à ce qu'une majorité des flux élémentaires reliés à ce produit aient lieu avant le moment initial de disponibilité du processus.

Pour le mode de caractérisation temporelle relatif des flux, les flux de processus définiront des quantités de processus appelés par période de temps et cette information est décrite par des distributions temporelles. Cette période de temps devient le pas de temps de la distribution puisqu'elle est équivalente à la précision de la caractérisation temporelle. De manière équivalente, les flux élémentaires définiront des quantités d'extractions ou d'émissions sous forme de distributions temporelles. La figure 4.2 décrit schématiquement comment les flux sont représentés par ce mode de caractérisation.

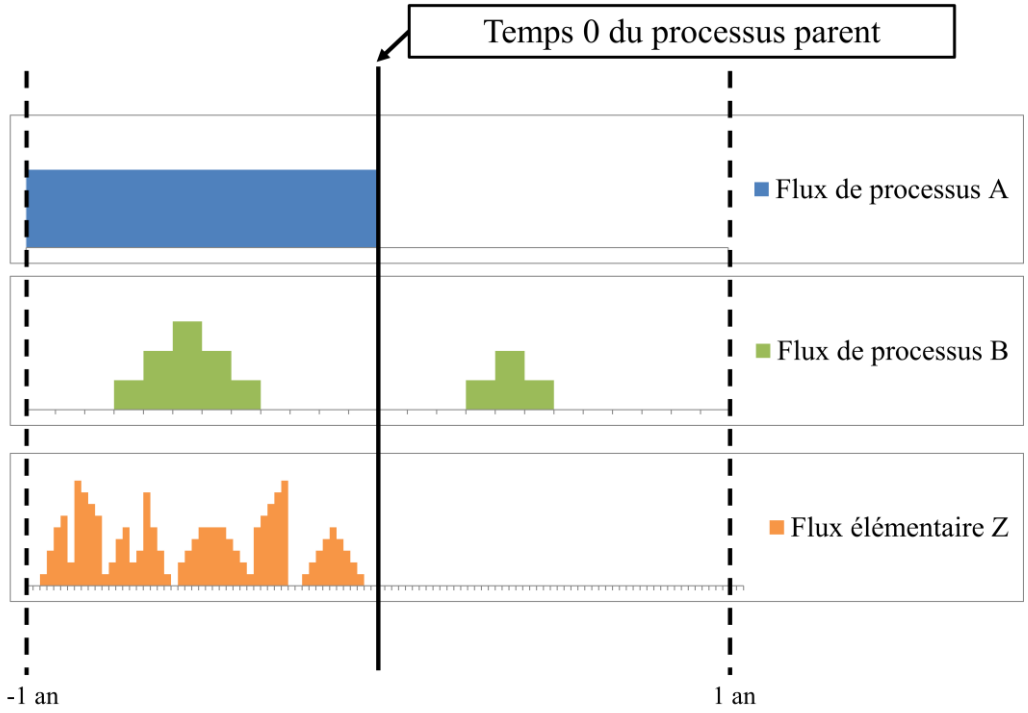


Figure 4.2 : Description de différents flux définis en utilisant le mode de caractérisation temporelle relative.

Trois flux sont définis dans la figure 4.2 pour un processus parent. Il s'agit de deux flux de processus A et B et d'un flux élémentaire Z. Tous ces flux sont liés à la réalisation d'un même processus parent et sont référés au même temps 0. A titre d'exemple, chaque flux possède une précision (discrétisation) de caractérisation temporelle différente. Le flux de processus A possède une précision annuelle, le flux de processus B possède une précision mensuelle et le flux élémentaire Z possède une précision hebdomadaire.

Un exemple de définition de processus élémentaire est utilisé ici afin de mieux comprendre comment la caractérisation temporelle de la figure 4.2 peut être utilisée. L'exemple concerne un processus élémentaire répertoriant certains flux reliés à la fabrication d'une éolienne. Dans ce cas :

- Le temps 0 est le moment où l'éolienne est prête à produire de l'électricité
- Le flux de processus A peut définir la quantité d'acier nécessaire pendant l'année de fabrication de l'éolienne
- Le flux de processus B peut définir le transport mensuel nécessaire pour l'apport de matériaux et des travailleurs utiles à la fabrication de l'éolienne
- Le flux élémentaire Z peut définir la quantité d'émissions d'ozone relié à la soudure hebdomadaire lors de la fabrication de l'éolienne

Dans cet exemple, les informations accumulées pour la modélisation de la fabrication d'une éolienne varient beaucoup en fonction de leur précision. Cela démontre qu'il est possible de modéliser un processus malgré une information de précision variable sur les flux le constituant. Il faut aussi noter que le moment de mise en fonction de l'éolienne n'est pas fixé avant que le scénario soit défini.

Evaluation selon les critères de performance

Cette évaluation sert à faire une comparaison de ce nouveau mode de caractérisation temporelle relatif des flux avec l'évaluation qualitative de performance du mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires 1.0.

Critère 1 : minimiser le temps de travail

Recherche d'informations

Le temps de travail pour la recherche d'informations sur la caractérisation temporelle doit être équivalent à celui du mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires 1.0 puisqu'il s'agit du même type d'information.

Définition des fiches de données

Le temps de travail nécessaire à la description des fiches de données devrait être légèrement supérieur en temps de travail pour deux raisons. Premièrement parce qu'il faut maintenant ajouter une caractérisation temporelle pour chaque flux de processus. Il faut aussi considérer qu'il sera légèrement plus long de décrire une caractérisation temporelle par rapport au temps 0 que par rapport à un moment spécifique puisqu'il faut s'assurer de la correspondance des différents flux par rapport à ce moment.

Modélisation des systèmes

L'avantage marquant de ce mode de caractérisation provient du temps de travail lors de la modélisation des systèmes (création de BDDs) par l'utilisation de définition temporelle relative qui donne une plus grande généricité aux processus. En effet, la caractérisation temporelle étant relative au processus et non pas au cycle de vie du système modélisé, il est possible d'utiliser la définition du processus pour différents scénarios et systèmes.

L'utilisation de distributions temporelles relatives à un processus permet de minimiser le travail relié à la modélisation des systèmes pour différentes études ACV. Toutefois, ce principe n'est applicable que si le processus est invariable par translation temporelle au sein d'une chaîne de production. Cette situation n'est pas systématique et limite donc la réutilisation des processus caractérisés au niveau temporel. L'identification des limites d'invariabilité par translation temporelle peut se faire à partir d'une information sur le domaine temporel de validité. Il faut donc conserver l'information sur le domaine de temps où le processus est représentatif de l'étape qu'il décrit.

L'invariabilité par translation temporelle d'un processus de fabrication de modules PV est un exemple où le domaine de validité n'est que de quelques années puisque la technologie se modifie rapidement en ce moment. Un processus élémentaire de fabrication d'aluminium pourrait, quant à lui, avoir un domaine de validité temporelle plus important puisqu'il représente une technique qui connaît aujourd'hui une évolution moins rapide. L'invariabilité par translation temporelle ne peut cependant pas s'appliquer à des processus relatifs à la construction d'infrastructure.

Le terme infrastructure prend un sens spécifique avec ce mode de caractérisation. Ce type de processus se relie, dans ce cas, à des systèmes ayant une date spécifique de mise en place. Un barrage hydroélectrique est un bon exemple d'infrastructure vu le nombre réduit et la durée de vie du système. Une maison n'est cependant pas nécessairement une infrastructure puisqu'il existe un nombre important de constructions par année pour une région de taille suffisante comme un pays. Il n'est alors pas nécessaire de spécifier à une date spécifique de fin de fabrication d'une maison, mais plutôt à un âge moyen de bâtiments. L'application de ce mode de caractérisation pour la modélisation des systèmes de différentes études devrait permettre de mieux cadrer les processus représentant des infrastructures.

Analyse des résultats et des systèmes

La discussion présentée pour cette partie de l'analyse du temps de travail du mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires 1.0 est encore valable ici.

Critère 2 : potentiel de précision

Description des systèmes et modélisation des impacts environnementaux

Le format de caractérisation temporelle de ce nouveau mode n'est pas différent du mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires 1.0 et il offre donc, théoriquement, la même possibilité de précision pour la modélisation des systèmes et des impacts environnementaux dans le cadre d'un ACV.

Vérification des conditions de viabilité

Capacité de gestion d'une précision variable – Méthode itérative

La capacité de gestion d'une précision variable de la caractérisation temporelle avec ce mode est équivalente à celle du mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires 1.0.

Possibilité de propager la caractérisation dans l'ICV

Un inconvénient important de l'utilisation du mode de caractérisation temporelle relatif des flux est lié à l'étape du calcul d'ICV. En effet, la méthode de calcul d'ICV actuelle ne permet pas de repositionner la caractérisation temporelle relative par rapport au cycle de vie d'un scénario. De plus, comme indiqué pour le mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires 1.0, la forme standard du calcul d'ICV ne peut utiliser des distributions pour représenter les éléments des matrices et vecteurs en entrée du calcul. C'est le produit matriciel qui pose ici problème. Il faut donc proposer une méthode de propagation des caractéristiques temporelles relatives lors du calcul d'ICV si ce mode de caractérisation est retenu.

Utilité du format pour la modélisation des impacts environnementaux

Le format de description temporelle des flux élémentaires pour ce mode est équivalent à celui du mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires 1.0. Il aura donc la même utilité si la temporalité de l'ICV correspond à celle du cycle de vie du scénario analysé. L'utilité du format est donc en lien avec la proposition d'une nouvelle méthode de calcul d'ICV permettant de repositionner la caractérisation temporelle relative par rapport au cycle de vie d'un scénario.

Résumé des aspects distinctifs de ce mode de caractérisation

Le mode de caractérisation temporelle relatif des flux se démarque par l'utilisation d'une caractérisation relative au processus qui augmente la généricité de ces processus. Il devient alors possible d'utiliser des BDDs caractérisées avec ce mode pour décrire différents systèmes dans différents scénarios et différentes études. Il semble donc que ce mode de caractérisation permette de faire des études ACV considérant l'aspect temporel et d'avoir un niveau de complétude équivalent à l'état de l'art actuel. Cependant, cette possibilité nécessite la création d'une méthode de calcul d'ICV qui puisse gérer le format utilisé d'une distribution temporelle.

Discussion supplémentaire

Le mode de caractérisation relatif requiert l'utilisation d'un temps 0 dans la définition des processus. Ce temps 0 a été fixé arbitrairement au moment ou le produit du processus est rendu disponible. Cette règle doit devenir un consensus pour toutes les BDDs si le partage d'information entre ces BDDs permet aussi le partage de l'information sur la temporalité des processus. Il semble donc qu'il soit maintenant nécessaire d'ajouter une règle méthodologique pour la création de processus au sein des BDDS si ce mode est accepté par la communauté. D'autres règles devront potentiellement être envisagées et une discussion plus approfondie devra être faite à ce sujet.

Résumé de l'analyse des modes de caractérisation proposés

Le tableau 4-3 reprend le format des tableaux 4-1 et 4-2 pour résumé l'évaluation de la performance des modes de caractérisation spatiale et temporelle qui sont proposés dans cette sous-section.

Tableau 4-3 : Résumé de l'évaluation qualitative de pertinence des nouveaux modes de caractérisation spatiale et temporelle proposés en fonction de l'analyse par rapport aux critères et conditions du cadre d'évaluation

		Flux élémentaire 2.0 (spatiale)	Relatif des flux (temporelle)
Critères de performance	Temps de travail	*Moins que pour le mode de caractérisation spatiale des processus 1.0* *Légèrement supérieur à celui du mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 1.0*	*Important* Description relative des processus Redonne une pertinence aux BDDs
	Potentiel de précision	*Haut potentiel* Fonction des besoins des méthodes de modélisation des impacts environnementaux	*Haut potentiel* L'utilisation de distributions temporelles permet une très grande précision
Conditions de viabilité	Gestion d'une précision variable - Méthode itérative -	*Oui*	*Oui*
	Propagation de la caractérisation à l'ICV	*Oui*	*Non*
	Utilité pour la modélisation des impacts	*Oui*	*Oui* *(dépend de la propagation)*

Ce résumé explique pourquoi ces nouveaux modes de caractérisation spatiale et temporelle sont intéressants. Une comparaison avec les modes de caractérisation existants est toutefois nécessaire pour comprendre pourquoi ces nouveaux modes seront retenus comme développements méthodologiques améliorant les capacités de considérations des spécificités spatiotemporelles dans les études ACV.

4.4 Récapitulatif des évaluations des modes de caractérisation

Cette section résume et compare, de manière simple, les évaluations des modes de caractérisation spatiale et temporelle existants et nouvellement développés. Le tableau 4-4 présente le positionnement qualitatif de chacun des modes par rapport aux autres. La comparaison est valide pour les modes touchant le même type de caractéristique. Il ne faut donc pas comparer l'évaluation d'un mode de caractérisation spatiale avec l'évaluation d'un mode de caractérisation temporelle.

Tableau 4-4 : Comparaison résumée des évaluations qualitatives des différents modes de caractérisation présentés dans le chapitre 4 (existants et nouvellement proposés)

		Flux élémentaire 1.0 (temporelle)	Relatif des flux (temporelle)	Flux élémentaire 1.0 (spatiale)	Flux de processus 1.0 (spatiale)	Flux élémentaire 2.0 (spatiale)
Critères de performance	Temps de travail	+++	+	*Réf.*	++	+
	Potentiel de précision	*Fort*	*Fort*	*Faible*	*Fort*	*Fort*
Conditions de viabilité	Gestion d'une précision variable - Méthode itérative -	√	√	×	√	√
	Propagation de la caractérisation à l'ICV	√	×	√	×	√
	Utilité pour la modélisation des impacts	√	√	√	√	√

Le résumé offert par ce tableau permet de mieux comprendre pourquoi le mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 2.0 et le mode de caractérisation temporelle relatif des flux sont retenus. C'est, en fait, la fusion de ces deux modes qui crée le mode de caractérisation spatiotemporelle proposé comme standard.

4.5 Résumé du chapitre

Ce chapitre permet de proposer un mode de caractérisation spatiotemporelle pour les sources d'information utilisées dans différentes études ACV. Le mode retenu permet d'améliorer la capacité de considération des spécificités spatiotemporelles de la méthode ACV. Plusieurs étapes ont été nécessaires pour obtenir cette proposition.

Définition d'un cadre d'évaluation des modes de caractérisation et évaluation des modes existants

Un cadre d'évaluation de la pertinence des modes de caractérisation est proposé pour faire une évaluation qualitative des modes de caractérisation spatiale et temporelle existants. Ce cadre se définit en considérant les principes généraux de la méthode ACV ainsi que des difficultés typiques de mise en œuvre rencontrées lors de la considération des spécificités spatiotemporelles. Le cadre se résume par deux critères de performance et trois conditions de viabilité. La minimisation du temps de travail pour la considération des spécificités spatiotemporelles et l'évaluation du potentiel de précision de la caractérisation constitue les deux critères de performance. La capacité de gestion de précision variable pour la caractérisation spatiotemporelle, la possibilité de propager les caractéristiques spatiotemporelles du système à l'ICV et l'utilité du format de caractérisation de l'ICV pour la modélisation des impacts environnementaux sont, quant à elles, les conditions de viabilité du cadre.

Ce cadre est ensuite utilisé pour faire l'évaluation de la pertinence des modes de caractérisation spatiale et temporelle existants. Les deux modes de caractérisation spatiale (voir sous-section 4.2.1) et le mode de caractérisation temporelle (voir sous-section 4.2.2) sont donc évalués. Ces évaluations permettent d'identifier plusieurs avantages et inconvénients aux modes de caractérisation existants. C'est l'identification des inconvénients majeurs qui a permis de proposer de nouveaux modes de caractérisation spatiale et temporelle.

Proposition de nouveaux modes de caractérisation spatiale et temporelle

Un nouveau mode de caractérisation spatiale est proposé. Il est nommé : mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 2.0. Il requiert que chaque flux élémentaire soit spécifiquement défini par un compartiment, un sous-compartiment et une région décrite par le format KML. La précision spatiale de la caractérisation provient majoritairement de la taille des régions utilisées pour la caractérisation des flux élémentaires. Il faut aussi ajouter une caractérisation spatiale des processus qui sert de balise d'identification pour dissocier des processus différents dans leur spatialité.

Un nouveau mode de caractérisation temporelle est proposé. Il est nommé : mode de caractérisation temporelle relatif des flux. Il requiert que tous les flux (de processus et élémentaires) définis par un processus soient décrits par des distributions temporelles. Ces distributions représentent des mesures et elles doivent donc posséder un support compact. Le temps 0 de ces distributions est fixé arbitrairement au moment où le processus en lien avec ces flux rend son produit disponible. Le pas de temps de ces distributions est représentatif du niveau de précision de la caractérisation temporelle.

Evaluation qualitative et comparative des modes de caractérisation présentés

L'évaluation qualitative et comparative des modes de caractérisation spatiale et temporelle permet de choisir le mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 2.0 et le mode de caractérisation temporelle relatif des flux.

Les deux modes retenus ont été choisis puisqu'ils offrent de meilleures performances par rapport aux critères du cadre d'évaluation et qu'ils respectent aussi presque toutes les conditions de viabilité du même cadre. En effet, le mode de caractérisation temporelle relatif des flux ne permet pas encore une propagation des caractéristiques temporelles lors de l'étape du calcul d'ICV.

5 MODIFICATION DU CALCUL D'ICV

Le chapitre 4 présente une démarche pour choisir un mode de caractérisation spatiotemporelle décrivant les systèmes modélisés. Ce mode est en fait la fusion du mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 2.0 et du mode de caractérisation temporelle relatif des flux. Le mode de caractérisation temporelle relatif des flux a été analysé dans la sous-section 4.3.2 et il a été identifié comme ne respectant pas une des conditions de viabilité du cadre d'évaluation des modes de caractérisation. Il est, en effet, impossible d'utiliser le format d'information (distribution temporelle relative) dans le calcul standard d'ICV. Normalement, cette conclusion indiquerait que le mode ne peut être retenu, mais l'avantage majeur de ce mode, pour la caractérisation temporelle de BDDs, est une raison suffisante pour modifier la méthode de calcul d'ICV afin de pouvoir utiliser les distributions temporelles relatives.

L'objectif de ce chapitre est donc de présenter une démarche permettant de modifier la méthode de calcul des ICVs afin de pouvoir utiliser le format des distributions temporelles pour propager la caractérisation temporelle entre le système modélisé et son ICV correspondant. Il s'agit ici surtout d'une démonstration mathématique permettant de confirmer la validité de ces modifications.

La section 5.1 rappelle les freins à l'utilisation de distributions temporelles relatives en fonction de la méthode de calcul d'ICV standard. C'est à partir de ces freins que les modifications nécessaires sont identifiées. La présentation organisée de ces modifications décrit ainsi la démarche permettant d'obtenir la nouvelle méthode de calcul des ICVs qui peut utiliser les distributions temporelles.

La section 5.2 décrit comment informer les différents éléments de l'équation de la nouvelle méthode de calcul en fonction du format de caractérisation spatiotemporelle du mode retenu au chapitre 4. Toutes les spécificités de la matrice environnementale, de la matrice technologique, du vecteur de référence et du vecteur décrivant l'ICV sont présentées.

La section 5.3 fait un résumé des notions importantes du chapitre. Il y a donc une description de l'équation de la nouvelle méthode de calcul d'ICV : *ESPA+*. Une brève description des éléments constituant la nouvelle équation est fournie. Ces éléments sont définis à partir des flux permettant de modéliser le système à l'étude. Des commentaires supplémentaires sont présentés sur les limites de cette nouvelle méthode.

5.1 Utilisation de distributions temporelle pour le calcul d'ICV

La sous-section 4.3.2 (voir p. 4-21) décrit les spécificités de la caractérisation temporelle liée au mode de caractérisation choisi où tous les flux (technologiques et élémentaires) sont décrits par des distributions temporelles relatives. L'évaluation du mode de caractérisation temporelle relatif des flux (voir page 4-24) indique que la forme standard du calcul d'ICV ne peut gérer une information sous un format de distribution. Il faut donc proposer une nouvelle méthode de calcul permettant l'utilisation des informations provenant du mode de caractérisation temporelle retenu.

5.1.1 Identification des freins pour l'utilisation de distributions temporelles

L'utilisation de distributions temporelles relatives n'est pas compatible avec l'équation standard du calcul d'ICV et cette incompatibilité s'explique en fonction de deux freins. Il faut revenir à l'équation 2.2 pour les identifier.

$$\vec{v} = \mathbf{E} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{T})^{-1} \cdot \vec{r} \qquad \text{équation 2.2}$$

En posant que $\mathbf{Z} = (\mathbf{I} - \mathbf{T})^{-1}$, il est alors possible de définir le calcul de l'inventaire d'une substance α pour le cycle de vie de l'unité fonctionnelle définie dans $\vec{r}$, comme étant :

$$v_\alpha = \sum_j \sum_k e_{\alpha,j} \cdot z_{j,k} \cdot r_k \qquad \text{équation 5.1}$$

Où :
Les lettres minuscules sont utilisées pour référer aux éléments des vecteurs et matrices de l'équation
L'indice α décrit la ligne α du vecteur colonne $\vec{v}$
Les indices j et k discrétisent les processus servant à la modélisation du système
Les valeurs maximales de j et k doivent être équivalentes

L'équation 5.1 démontre que les éléments des différents matrices et vecteurs doivent être multipliés et ensuite additionnés afin d'obtenir les valeurs définissant les flux élémentaires de l'ICV ($\vec{v}$). L'utilisation de distributions temporelles définies relativement à différents temps 0 ne permet cependant pas d'utiliser un produit simple. Il s'agit donc du premier frein à l'utilisation de l'équation standard. Un produit de distributions donne, en effet, une multiplication des valeurs ayant une position équivalente par rapport à l'abscisse. L'opérateur mathématique doit plutôt permettre de repositionner la temporalité relative des flux par rapport à la temporalité du cycle de vie du processus appelé dans le vecteur de référence ($\vec{r}$).

Il existe un opérateur mathématique qui permet ce repositionnement et il s'agit du produit de convolution. Tous les produits standards entre les éléments des matrices doivent donc être remplacés par des produits de convolution entre les éléments qui sont maintenant des distributions temporelles. La figure 5.1 présente un schéma décrivant comment le produit de convolution permet de recadrer la caractérisation temporelle relative de différents flux.

Produit de convolution entre distributions temporelles

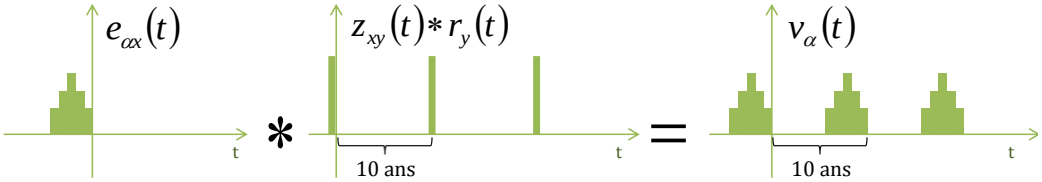


Figure 5.1 : Schéma décrivant le recadrage de la caractérisation temporelle relative à un processus élémentaire pour obtenir la caractérisation par rapport au cycle de vie du système modélisé.

La figure 5.1 présente un exemple de produit de convolution entre les distributions temporelles représentant un flux élémentaire $(e_{\alpha,j}(t))$ de la substance α et un flux de processus du cycle de vie $(z_{j,k}(t) *_\tau r_k(t))$. Le résultat obtenu $(v_\alpha(t))$ est la distribution temporelle du flux élémentaire α associé aux flux de processus appelés au cours du cycle de vie. Cet exemple de calcul indique bien que le flux élémentaire α provenant du processus technologique défini par $(z_{xy}(t) *_\tau r_y(t))$ se répète chaque fois que le processus technologique est appelé sur le cycle de vie.

L'équation 5.2 décrit, de manière plus générale, le calcul présenté à la figure 5.1 :

$$v_\alpha(t) = \sum_j \sum_k \left(e_{\alpha,j} *_\tau \left(z_{j,k} *_\tau r_k\right)\right)(t) \qquad \text{équation 5.2}$$

L'opérateur $*_\tau$ décrit ici un produit de convolution sur la dimension temporelle entre chacun des éléments des matrices et vecteurs.

Sous un autre format le calcul des produits de convolution peut être défini comme étant :

$$v_\alpha(t) = \sum_j \sum_k \int \; e_{\alpha,j}(t - t_2) \times \left(\int \; z_{j,k}(t_2 - t_1) \times r_k(t_1) dt_1\right) dt_2 \qquad \text{équation 5.3}$$

L'utilisation de produit de convolution impose cependant de nouvelles conditions dans le calcul de l'ICV. En effet, un produit de convolution appliqué à des distributions ne peut se faire que sous certaines conditions.

1. La caractérisation doit être invariable par translation temporelle[i];
2. Les distributions utilisées doivent être définies sur un support compact;
3. Une relation linéaire entre les distributions utilisées est nécessaire.

Les deux premières conditions sont validées par la définition imposée lors de la description des distributions temporelles (sous-section 4.3.1). La troisième condition n'est pas validée dans la forme standard de calcul des ICVs (voir équation 2.2) puisqu'il existe une relation non-linéaire dans le terme modélisant les flux de processus du cycle de vie du système : $(\mathbf{I-T})^{-1}$.

[i] C'est-à-dire qu'une distribution temporelle représentative d'un flux élémentaire doit encore être représentative aux autres moments où elle est appelée sur le cycle de vie d'un système. Par exemple, le taux d'émission de CO_2 d'une centrale charbon en 2012 peut être estimé comme équivalent à celui de 2011.

Toutefois, le calcul d'ICV requiert donc l'inversion de la matrice technologique (**Z**) qui est un opérateur non linéaire de (**I-T**) et vient donc poser un problème dans l'utilisation des produits de convolution entre les flux de processus. Il s'agit d'ailleurs du 2e frein d'utilisation de l'équation standard du calcul d'ICV. Il est alors nécessaire de proposer un nouveau format pour l'équation permettant de définir l'ICV pour conserver la linéarité lors de la modélisation des liens entre processus d'un système.

La solution à ce problème de linéarité se trouve dans les méthodes de calcul permettant de représenter le calcul d'ICV sous la forme d'une série. Deux méthodes existent pour se faire. Il s'agit de la méthode du « Structural Path Assessment » et des « Power Series ». La méthode « Structural Path Assessment » a été décrite dans plusieurs articles (Defourny and Thorbecke 1984; Lenzen 2007; Lenzen and Crawford 2009; Sonis *et al.* 1997). La méthode « Power Series » utilise le même principe de base pour la modification du calcul et a été définie dans la publication de Suh et Heijungs (2007). Ces méthodes servent surtout à redéfinir la structure de la chaîne de production pour aider à l'analyse du système. Le développement mathématique suivant décrit comment ces méthodes transforment l'équation standard du calcul d'ICV.

L'équation standard du calcul d'ICV est définie par la forme suivante :

$$\vec{v} = \mathbf{E} \times (\mathbf{I} - \mathbf{T})^{-1} \times \vec{r} \qquad \text{équation 2.2}$$

Il est possible de développer une série géométrique équivalente pour une partie de l'équation précédente :

$$\frac{1}{(1 - \mathbf{T})} = (1 - \mathbf{T})^{-1} = 1 + \mathbf{T} + \mathbf{T}^2 + \mathbf{T}^3 + \cdots \qquad \text{équation 5.4}$$

Ici, la norme de T doit être < 1. Il faut aussi préciser que le développement de la série est ici appliqué à une variable simple, mais que le principe s'applique de manière équivalente aux matrices.

Il est donc possible de remplacer le terme $(\mathbf{I} - \mathbf{T})^{-1}$ dans l'équation 2.2 par la série décrite dans l'équation 5.4 :

$$\vec{v} = \mathbf{E} \times (\mathbf{I} + \mathbf{T} + \mathbf{T}^2 + \mathbf{T}^3 + \cdots) \times \vec{r} \qquad \text{équation 5.5}$$

La linéarité par rapport à chaque monôme de $\mathbf{T}$ qui correspond à un niveau du système de processus peut aussi être clarifiée par l'équation suivante :

$$\vec{v} = \mathbf{E} \times (\mathbf{I} + \mathbf{T} + \mathbf{T} \times \mathbf{T} + \mathbf{T} \times \mathbf{T} \times \mathbf{T} + \cdots) \times \vec{r} \qquad \text{équation 5.6}$$

Il ne faut cependant pas oublier que la suite pourra converger seulement si les conditions présentées dans la sous-section 2.4.2 sont respectées.

L'équation 5.6 décrit comment obtenir une relation linéaire entre tous les termes de l'équation servant à calculer un ICV. La propagation de la caractérisation temporelle relative devient alors possible lorsque tous les produits simples sont remplacés par des produits de convolution. L'équation 5.7 décrit le positionnement des produits de convolution.

$$\vec{v} = \mathbf{E} *_\tau (\mathbf{I} + \mathbf{T} + \mathbf{T} *_\tau \mathbf{T} + \cdots) *_\tau \vec{r}$$ équation 5.7

L'équation 5.7 permet le calcul d'un ICV en propageant la caractérisation temporelle définie selon le mode de caractérisation temporelle relative. Cette nouvelle méthode de calcul est nommée ESPA pour « Enhanced Structural Path Assessment » (Beloin-Saint-Pierre and Blanc 2011a, 2011b). Elle résout le problème soulevé à la sous-section 4.2.2 qui soulignait l'impossibilité d'utiliser le mode de caractérisation temporelle relatif. Il s'agit donc de la méthode de calcul qui sera retenue pour obtenir des ICVs caractérisés au niveau temporel.

5.1.2 Mise en œuvre de la méthode ESPA pour le calcul d'ICV

Il existe deux concepts importants à considérer lorsque la méthode ESPA est utilisée. Il s'agit de la limite à fixer sur le niveau de la chaîne de production et de la gestion d'une précision variable pour la caractérisation temporelle des distributions.

Limite de la considération des processus dans le système

La méthode ESPA repose sur l'utilisation de la série pour propager la caractérisation temporelle à travers le calcul d'ICV. Il n'est toutefois pas possible de faire un calcul sur la totalité de cette série puisqu'elle est théoriquement infinie. Il faut donc fixer un niveau limite qui sera considéré pour le calcul d'un ICV caractérisé au niveau spatiotemporel. Un choix judicieux de cette limite est important puisque les flux élémentaires de tous les processus qui sont à l'extérieur du système modélisé seront négligés. Il est donc possible qu'une limite mal fixée puisse négliger une portion importante du système qui soit responsable d'une partie importante des impacts environnementaux du cycle de vie d'un produit.

Procédure pour établir la limite de dynamisation de la modélisation

Une méthode suggérée pour arriver à évaluer cette limite débute par une évaluation des impacts environnementaux sans considération temporelle avec le calcul standard d'ICV (qui considère l'ensemble du système qui est modélisé). Ces valeurs d'impacts deviennent les références pour fixer la limite de la propagation temporelle. Il faut ensuite identifier un pourcentage acceptable d'impacts environnementaux qui ne seront pas caractérisés au niveau temporel. Il s'agit en fait d'un pourcentage de coupure qui arrête le calcul de la méthode ESPA. Une fois que ce pourcentage est fixé, le calcul de l'ICV caractérisé au niveau temporel peut débuter. Un test se fait ensuite à chaque niveau de la série pour évaluer le pourcentage des impacts couvert par l'ICV obtenu jusqu'à ce niveau. Il faut donc mesurer les impacts environnementaux en lien avec la somme des ICVs de chaque niveau du système. Cette évaluation des impacts environnementaux par niveau doit se faire avec les FCs qui ne considèrent pas la caractérisation temporelle pour qu'il y ait correspondance avec les valeurs de référence. Le calcul de l'ICV temporel s'arrête lorsque les impacts de la sommation des ICVs de chaque niveau sont équivalents ou supérieurs aux valeurs de référence. Il est ensuite possible de faire l'évaluation des impacts environnementaux avec des FCs qui considèrent la temporalité du système.

Cette méthode est simple et permet rapidement de fixer un niveau à la sommation du calcul de l'ICV avec la méthode ESPA. Il faut cependant noter que le pourcentage de coupure est fixé en fonction de FCs qui ne considère pas la temporalité. Le pourcentage de coupure n'est donc pas équivalent à la quantité d'impacts environnementaux qui est négligée par une modélisation des impacts environnementaux qui considère la temporalité.

Gestion du manque de correspondance entre l'ICV et les méthodes de modélisation des impacts

Le mode de caractérisation temporelle relative qui est retenu permet de caractériser chaque flux du système au niveau temporel avec des précisions variables. Cette possibilité est un avantage pour la flexibilité lors de la modélisation du système, mais elle amène aussi une difficulté au niveau de la gestion de la précision lors du calcul avec la méthode ESPA. En effet, le produit de convolution entre deux distributions n'ayant pas le même niveau de précision va nécessiter une hypothèse.

Deux possibilités sont envisagées pour le choix de cette hypothèse.

Un choix intéressant pour garder un haut niveau de précision est de redéfinir le pas de temps de la distribution la moins précise afin que celui-ci corresponde au pas de temps de la distribution la plus précise. Dans ce cas, la distribution résultante du produit de convolution possède le pas de temps le plus précis. Ce résultat est obtenu en faisant l'hypothèse que le flux de la distribution, avec le plus grand pas de temps (faible précision), est uniforme. Cette hypothèse n'est pas nécessairement valide puisque le pas de temps représente plutôt le niveau de précision qu'il a été possible d'obtenir lors de la modélisation du système. Ce choix donne donc une fausse impression de précision sur le résultat.

Un choix plus conservateur, mais plus représentatif du niveau de précision connu est de sommer les flux de la distribution la plus précise sur le pas de temps de la distribution la moins précise. De cette façon, la distribution résultante du produit de convolution possède la même précision que celle de la distribution la moins précise. Le résultat est donc représentatif du niveau de précision connu lors de la modélisation du système. Ce choix risque fort d'amener une faible précision sur plusieurs résultats d'ICV puisqu'un seul flux de processus imprécis va affecter tous les flux de processus et élémentaires subséquents dans le système. Le résultat donne cependant plus d'information sur le niveau de connaissance de la temporalité lors de la modélisation du système.

5.2 Méthode ESPA+ pour le calcul d'ICV

La section 4.3 a défini les modes de caractérisation spatiale et temporelle qui sont retenus pour le développement de la phase de modélisation des systèmes (définition des processus de BDDs). La section 5.1 a proposé la méthode ESPA de calcul d'ICV permettant de propager la description temporelle du mode de caractérisation temporelle relatif des processus.

Ces deux résultats sont maintenant combinés pour définir la proposition de la méthode *ESPA+* de calcul d'ICV qui soit caractérisé au niveau spatiotemporel. L'ICV caractérisé au niveau spatiotemporel doit ensuite servir à la modélisation d'impacts environnementaux qui considère la variabilité spatiotemporelle des systèmes.

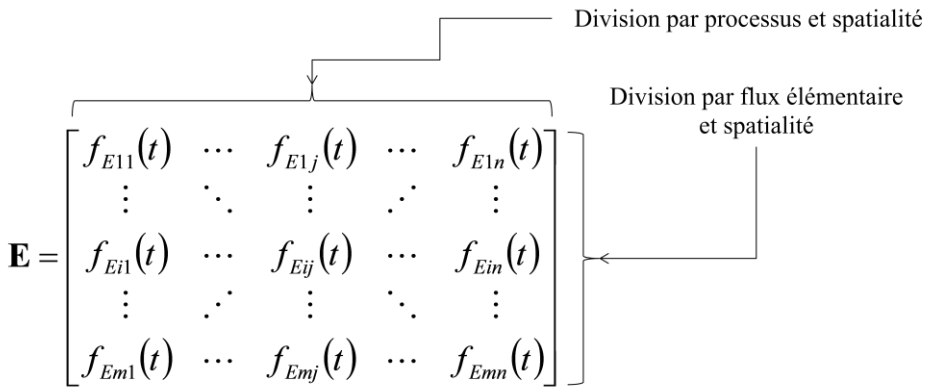
La description de la méthode *ESPA+* permettant d'obtenir des ICVs caractérisés au niveau spatiotemporel sera divisée en trois parties (sous-section). La sous-section 5.2.1 décrit comment transférer les données de description d'un système pour créer les matrices et vecteurs d'entrée nécessaires au calcul de l'ICV. La sous-section 5.2.2 présente la définition de l'équation utilisée pour le calcul d'un ICV caractérisé au niveau spatiotemporel. La section 5.2.3 présente, quant à elle, une description de l'information disponible dans l'ICV obtenu ainsi qu'une discussion sur les hypothèses à faire pour la gestion des variabilités de précision dans la caractérisation spatiotemporelle.

5.2.1 Description des entrées pour l'étape du calcul d'ICV

Les entrées de l'équation du calcul d'ICV se divisent en deux matrices et un vecteur. Il s'agit de la matrice environnementale $\mathbf{E}$, de la matrice technologique $\mathbf{T}$ et du vecteur de référence $\vec{r}$. Il faut définir la structure et les informations de ces trois entrées pour passer à l'étape du calcul d'ICV.

La matrice environnementale

La matrice environnementale $\mathbf{E}$ définit les m flux élémentaires pour les n processus de l'activité humaine. La figure 5.2 offre une représentation graphique de la matrice environnementale $\mathbf{E}$.



Ici:

$f_{Eij}(t)$ est la distribution temporelle décrivant le flux élémentaire i lié au processus j
les distributions sur la colonne j possèdent tous le même temps 0 de référence
$1 < i < m = q \times r \times s$
q : le nombre de combinaison « compartiments et sous-compartiments » (voir tableau 2-3)
r : le nombre de flux élémentaires
s : le nombre de régions du système
$1 < j < n = s \times u$
u : le nombre de processus technologiquement différent

Figure 5.2 : Description graphique de la structure et des informations disponibles dans la matrice environnementale $\mathbf{E}$ pour la méthode de calcul d'ICV spatiotemporel.

Les m flux élémentaires sont subdivisés par les r substances, les q combinaisons de compartiments et sous-compartiments (13 combinaisons dans le tableau 2-3) et les s régions. La matrice **E** possèdent aussi n colonnes reliées aux n processus décrivant l'activité humaine. Il faut ici aussi faire une subdivision des processus équivalents, mais avec une spatialité différente donc il y aura $n = s \times u$ processus où u est le nombre de processus technologiquement différents. Chaque élément de la matrice **E** est une distribution temporelle décrivant les flux élémentaires avec une temporalité relative au n processus. Il est intéressant de noter que tous les flux élémentaires d'une colonne posséderont le même temps 0 puisqu'ils sont reliés au même processus.

La matrice technologique

La matrice technologique **T** décrit les flux de processus entre les n différents processus qui définissent le système modélisé. La figure 5.3 offre une représentation graphique de la matrice technologique **T** et des informations qui y sont liées.

Division par processus et spatialité

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} f_{T11}(t) & \cdots & f_{T1j}(t) & \cdots & f_{T1n}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \iddots & \vdots \\ f_{Ti1}(t) & \cdots & f_{Tij}(t) & \cdots & f_{Tin}(t) \\ \vdots & \iddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{Tn1}(t) & \cdots & f_{Tnj}(t) & \cdots & f_{Tnn}(t) \end{bmatrix}$$

Ici:

$f_{Tij}(t)$ est la distribution temporelle décrivant le flux de processus i nécessaire à la réalisation du processus j
les distributions sur la colonne j possèdent tous le même temps 0
$1 < j < n = s \times u$
s : le nombre de régions du système
u : le nombre de processus technologiquement différents

Figure 5.3 : Description graphique de la structure et des informations disponibles dans la matrice technologique **T** pour la méthode de calcul d'ICV spatiotemporel.

Le nombre de processus de la matrice technologique doit être équivalent au nombre de processus utilisés pour la matrice environnementale **E**. La matrice technologique **T** doit donc aussi faire une différentiation entre des processus technologiquement équivalent, mais ayant une spatialité différente. Dans cette matrice technologique **T**, la ligne i représente le même processus que la colonne j équivalente. Il s'agit donc d'une matrice de forme « Input/Output », mais définissant des flux de processus plutôt que des flux économiques. Ce choix explique le commentaire de la page 2-25 sur le choix d'un type de matrice technologique. Chaque élément de la matrice technologique est un flux de processus représenté par une distribution temporelle. Toutes les distributions temporelles doivent respecter les conditions précédemment établies et être positives ou nulles sur la totalité de leur support compact.

Le vecteur de référence

Le vecteur de référence $\vec{r}$ décrit les flux de processus pour les n différents processus qui définissent le flux de référence. La figure 5.4 offre une représentation graphique du vecteur de référence $\vec{r}$ et des informations qui y sont liées.

$$\vec{r} = \begin{bmatrix} f_{r1}(t) \\ \vdots \\ f_{rj}(t) \\ \vdots \\ f_{rn}(t) \end{bmatrix} \longleftarrow \text{Division par processus et spatialité}$$

Ici:

$f_{ri}(t)$ est la distribution temporelle décrivant le flux de processus i lié au flux de référence
Toutes les distributions sur la colonne possèdent le même temps 0 qui est celui de l'étude ACV
$1 < j < n = s \times u$
s : le nombre de région du système
u : le nombre de processus technologiquement différent

Figure 5.4 : Description graphique de la structure et des informations disponibles dans le vecteur de référence $\vec{r}$ pour la méthode de calcul d'ICV spatiotemporel.

Le nombre de processus du vecteur de référence doit être équivalent au nombre de processus utilisés pour la matrice technologique $\mathbf{T}$. Le vecteur de référence $\vec{r}$ doit donc aussi faire une différentiation entre les processus technologiquement équivalents, mais ayant une spatialité différente. Chaque élément du vecteur de référence est un flux de processus représenté par une distribution temporelle. Toutes les distributions temporelles doivent respecter les conditions précédemment établies et être positives ou nulles sur la totalité de leur support compact. Le temps 0 de ces distributions fixe le moment de départ de l'ACV.

5.2.2 Equation du calcul d'ICV spatiotemporel

L'équation utilisée pour le calcul d'un ICV caractérisé au niveau spatiotemporel reprend la forme de l'équation 5.7 et utilise la structure des matrices et du vecteur présentés dans la sous-section précédente. L'équation reste donc :

$$\vec{v} = \mathbf{E} *_{temp} \left(\mathbf{I} + \mathbf{T} + \mathbf{T} *_{temp} \mathbf{T} + \cdots\right) *_{temp} \vec{r} \qquad \text{équation 5.7}$$

Conditions générales d'utilisation[i] :

1. La caractérisation doit être invariable par translation temporelle;
2. Les distributions utilisées doivent être définies sur un support compact;
3. Une relation linéaire entre les distributions utilisées est nécessaire ;
4. Les éléments doivent être des distributions temporelles relatives (sous-section 4.2.2) ;
5. Les processus spatialement différents doivent être dissociés ;
6. Le processus est l'unité de base pour la modélisation du système et est utilisé afin d'assurer la correspondance des structures des matrices et du vecteur.

[i] Les trois premières conditions sont une reprise des conditions présentées dans la sous-section 5.1.1

5.2.3 Résultats du calcul d'un ICV caractérisé au niveau spatiotemporel

Le résultat de l'équation 5.7 est un vecteur $\vec{v}$ qui définit l'ICV caractérisé au niveau spatiotemporel. Il s'agit en fait d'une liste de distributions temporelles décrivant des quantités de flux élémentaires pour différents types de substances dans différentes régions. Toutes ces quantités sont liées au cycle de vie du système en lien avec le flux de référence du scénario. Il est intéressant d'analyser l'information disponible dans ce type de résultats pour identifier comment cette information peut être utilisée pour les étapes de modélisation des impacts et d'analyse du scénario.

Format de l'information pour la description du système

Les ICVs définis au niveau spatiotemporel renfermeront beaucoup d'information. La représentation des résultats doit être réfléchie pour simplifier la phase d'analyse de l'inventaire. La figure 5.5 décrit un format potentiel de présentation des résultats qui permet de gérer l'information disponible de manière simple. Cette même figure présente un exemple de résultats pour aider à la discussion.

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} f_{v1}(t) \\ \vdots \\ f_{vi}(t) \\ \vdots \\ f_{vm}(t) \end{bmatrix}$$

Divisions de la temporalité sur une 2e dimension

Exemple simplifié du format

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 (Années)		
	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	Région 1	Substance 1
	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	Région 2	
	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	Région 3	
	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	Région 1	Substance 2
	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	Région 2	
	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	Région 3	
	7	0	0	0	0	0	0	1	1	0	Région 1	Substance 3
	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	Région 2	
	0	4	0	0	0	0	3	0	0	1	Région 3	

Ici:

$f_{vi}(t)$ est la distribution temporelle décrivant le flux élémentaire i lié à l'ACV du scénario
les distributions sur la colonne possèdent tous le même temps 0 qui est celui de l'ACV
$1 < i < m = q \times r \times s$
q : le nombre de combinaison compartiments et sous-compartiments (voir tableau 2-3)
r : le nombre de substances différentes (= 3 dans cet exemple)
s : le nombre de régions du système (= 3 dans cet exemple)

Figure 5.5 : Proposition de format d'un ICV caractérisé au niveau spatiotemporel (exemple annuel)

La figure 5.5 présente la description fondamentale de l'ICV à gauche et un exemple simplifié d'une représentation possible de résultat avec 3 flux élémentaires en fonction du temps pour 3 régions spécifiques.

L'exemple simplifié est présenté ici surtout pour illustrer comment faire l'agrégation au niveau spatial ou temporel. Le vecteur ICV est, dans ce cas, représenté par une matrice 2D où les colonnes divisent les flux élémentaires en fonction des années sur une période de 10 ans. L'agrégation sur les régions peut donc se faire pour une même substance en addition les valeurs des différentes lignes. Il est aussi possible de faire l'agrégation temporelle en additionnant les valeurs des différentes colonnes. Il est aussi possible de s'approcher de l'ICV standard si une agrégation spatiale et temporelle est réalisée. Des flux élémentaires avec des précisions différentes seraient cependant plus difficiles à agréger.

Hypothèse pour l'agrégation de régions et périodes de temps variables

La caractérisation spatiotemporelle d'un ICV obtenu avec la méthode *ESPA+* possède le même format que celui des modes de caractérisation spatiale et temporelle présentés dans la section 4.3. Il est donc possible que la précision spatiale et temporelle soit différente entre les flux élémentaires. L'agrégation (la sommation) de ces flux nécessite alors des hypothèses. Il s'agit en fait d'un problème équivalent à celui qui a été relevé pour la méthode de calcul ESPA. Encore une fois, il existe différentes hypothèses qui peuvent être utilisées pour arriver à un résultat.

Au niveau spatial

Lorsque des régions se superposent, il faut être capable de déterminer la proportion des flux élémentaires de chacune des régions qui doit s'additionner pour décrire le flux élémentaire relié à la sous-région de superposition. Pour y arriver, une hypothèse simple est de considérer que le flux élémentaire de chaque région est uniforme au niveau spatial. Les proportions à additionner sont alors déduites en fonction d'un rapport entre la superficie de superposition et les superficies de régions en question. Cette hypothèse n'est cependant pas représentative de la réalité. A titre d'exemple, les flux élémentaires de la production d'électricité en France ne sont pas uniformes sur le territoire de la France, mais bien concentrés au niveau des différentes centrales. Une autre hypothèse de répartition en fonction du centre des régions est proposée par Mutel *et al*. (2011) bien que l'explication soit faite par rapport aux facteurs de caractérisation. Cette nouvelle hypothèse ne semble cependant pas plus valide sauf si la caractérisation spatiale est très précise.

Une hypothèse plus conservatrice est de diminuer la précision des flux élémentaires définis pour des régions partiellement superposées et de les additionner pour la région la plus précise qui encadre les deux premières régions. De cette manière, aucune supposition n'est faite sur la position réelle des sources de flux élémentaires et seule la précision du résultat est touchée.

La difficulté d'agrégation au niveau spatial devrait être faible si une liste de régions standards est mise à la disposition des personnes responsables de la modélisation des systèmes. Il semble d'ailleurs que la 3e version d'ecoinvent (Weidema *et al*. 2012) suive cette voie puisqu'il ne sera pas possible de définir des régions qui se superposent pour la caractérisation des processus.

Au niveau temporel

L'agrégation au niveau temporel pose le même type de problème. Des hypothèses pour résoudre ce problème sont déjà proposées à la page 5-6 et il est possible d'appliquer la même logique ici. La démarche simple ou conservatrice ne sera donc pas réexpliquée.

Discussion complémentaire

Le temps 0 de référence des distributions temporelles de l'ICV peut être utile s'il correspond à l'instant où l'analyse est faite. Sous cette condition, il est possible d'identifier tous les flux élémentaires qui ont eu lieu dans le passé et ceux qui devraient avoir lieu dans le futur. Il est donc possible de dissocier les flux élémentaires ayant déjà eu lieu de ceux qui restent hypothétiques à cause d'une prédiction du futur et non pas seulement à cause de la modélisation.

Il devient aussi possible d'optimiser la chaîne de production pour que le système analysé soit responsable d'une moindre grande partie des flux élémentaires du futur. Ce niveau de détail peut être intéressant à considérer. En effet, le niveau d'effort à mettre pour diminuer la responsabilité sur des flux élémentaires qui ont déjà eu lieu peut sembler moins utile que la diminution de flux élémentaires prévus pour le futur.

5.3 Nouvelle méthode *ESPA+*

Ce chapitre présente une nouvelle méthode de calcul d'ICV qui est nommée *ESPA+*. Cette méthode permet de calculer un ICV caractérisé au niveau spatiotemporel en harmonie avec le mode retenu au chapitre 4. L'équation suivante décrit la nouvelle méthode de calcul *ESPA+*.

$$\vec{v} = \mathbf{E} *_{temp} \left(\mathbf{I} + \mathbf{T} + \mathbf{T} *_{temp} \mathbf{T} + \cdots\right) *_{temp} \vec{r} \qquad \text{équation 5.7}$$

Le résultat du calcul de l'ICV se retrouve dans le vecteur colonne $\vec{v}$. Les éléments de ce vecteur sont des distributions temporelles représentant les flux élémentaires caractérisés au niveau spatiotemporel pour le cycle de vie du système caractérisé par l'unité fonctionnelle définie dans le vecteur de référence $\vec{r}$.

La matrice environnementale $\mathbf{E}$ décrit les flux élémentaires à l'aide de distributions temporelles pour des processus technologiquement et spatialement différents. La différenciation spatiale des flux se fait au niveau des lignes de la matrice.

La matrice technologique $\mathbf{T}$ décrit les flux de processus des systèmes modélisés à l'aide de distributions temporelles pour des processus technologiquement et spatialement différents. La différenciation spatiale et technologique des flux se fait au niveau des lignes et colonnes de la matrice.

Le vecteur colonne de référence $\vec{r}$ décrit les flux de processus liés à l'unité fonctionnelle à l'aide de distributions temporelles pour des processus technologiquement et spatialement différents. La différenciation spatiale et technologique des flux se fait au niveau des lignes de ce vecteur colonne.

Trois modifications sont effectuées sur la méthode de calcul d'ICV standard pour obtenir la méthode ESPA. Il faut, premièrement, utiliser des distributions temporelles pour décrire tous les éléments des matrices et vecteurs plutôt que des valeurs numériques. Les distributions temporelles doivent respecter certaines conditions pour qu'elles puissent être utilisées. Il faut ensuite utiliser des produits de convolution sur la dimension temporelle ($*_{temp}$) plutôt que d'utiliser des produits matriciels simples entre les différents éléments de l'équation. C'est cet opérateur qui permet d'utiliser la caractérisation temporelle relative aux processus plutôt qu'une caractérisation temporelle relative aux scénarios. Finalement, il faut établir une relation linéaire entre tous les termes de l'équation permettant de faire le calcul de l'ICV. Pour y arriver, la série $1+T+T^2+T^3+\ldots$ est utilisée plutôt que la fonction équivalente $(1-T)^{-1}$. Cette linéarité est nécessaire pour l'utilisation de l'opérateur du produit de convolution.

L'utilisation d'une série impose une limite importante à ce nouveau calcul d'ICV. En effet, il est nécessaire, lors du calcul, d'arrêter la série à un certain niveau. Ce niveau d'arrêt implique donc une dynamisation partielle de l'ICV calculé. Les termes restants de la série ne sont effectivement pas considérés dans le calcul. Pour résumer, il devient impossible de caractériser, au niveau temporel, l'ensemble des flux élémentaires du cycle de vie d'un système avec cette méthode de calcul d'ICV. Il faut donc expliquer l'arrêt de la série afin d'identifier la partie négligée de l'ICV.

La discrétisation spatiotemporelle de l'ICV obtenu peut ne pas correspondre avec celle attendue pour la modélisation des impacts environnementaux. Il faut, dans ces situations, expliquer comment cette correspondance est établie pour bien comprendre le niveau de précision des résultats de la phase de modélisation des impacts. La description des hypothèses pour établir la correspondance est critique à la phase d'analyse de l'étude ACV.

Le développement de la méthode ESPA pour le calcul d'ICV permet maintenant de tester les développements méthodologiques proposés dans les chapitres 4 et 5 pour différents cas d'études. Ces tests sont présentés dans le chapitre suivant.

6 CAS D'ETUDES POUR LA PRODUCTION D'ENERGIE

Le chapitre 4 propose une méthode de caractérisation spatiotemporelle des flux décrivant les systèmes modélisés dans les études ACV. Le chapitre 5 présente ensuite la méthode *ESPA+* de calcul des ICVs qui permet d'utiliser la caractérisation spatiotemporelle définie à partir du mode proposé au chapitre 4. Ces développements méthodologiques interdépendants sont évalués seulement à partir de discussions théoriques dans leurs chapitres respectifs et il faut maintenant démontrer les avantages, limites et inconvénients de leurs utilisations. Une mise en œuvre de ces développements pour différents cas d'études devrait permettre l'identification de plusieurs limites et inconvénients qui doivent être considérés dans l'analyse de la pertinence de ces développements méthodologiques proposés.

C'est pour cette raison que l'objectif spécifique de ce chapitre est d' :

Appliquer les développements méthodologiques proposés pour différents cas d'études permettant d'évaluer leurs pertinences, intérêts et limites pour différentes études ACV

Le processus permettant l'analyse de la mise en œuvre du nouveau mode de caractérisation spatiotemporelle et de la méthode *ESPA+* de calcul d'ICV se définit en quatre étapes :

1. Expliquer les choix des systèmes qui servent de cas d'études;
2. Présenter les développements testés en fonction des cas d'études;
3. Evaluer certains développements méthodologiques avec les deux cas d'étude ;
4. Discuter plus globalement des observations en lien avec la mise en œuvre.

La section 6.1 décrit l'explication qui guide les choix des cas d'étude et la portée analytique de ceux-ci. Chaque cas d'étude nécessite un ou plusieurs scénarios pour faire l'évaluation environnementale d'un processus de production d'énergie.

La section 6.2 décrit le premier cas d'étude qui se distingue surtout par la simplicité du système qui est considéré pour représenter le scénario choisi. Il s'agit d'un scénario où l'on décrit les émissions de chaleur dans l'air relié à la phase de fabrication d'une installation PV de petite puissance. La simplicité du scénario permet une description détaillée de l'application du mode de caractérisation spatiotemporelle et de la méthode de calcul d'ICV choisis dans les chapitres 4 et 5. Cette description détaillée permet surtout une clarification sur la mise en œuvre des développements pour la considération des spécificités spatiotemporelles.

La section 6.3 présente l'application des développements retenus sur des scénarios et systèmes plus complexes. L'utilisation d'une méthode dynamique de modélisation des impacts est également explorée. Le niveau de complexité des systèmes se rapproche de celui envisagé pour les études ACV contemporaines. Ce cas d'étude permet donc de faire une évaluation plus représentative des difficultés à envisager lors de la mise en œuvre du mode de caractérisation spatiotemporelle et de la méthode de calcul d'ICV. Cette mise en œuvre se fait cependant seulement sur les considérations temporelles puisque les propositions de développements sont surtout supposées être utiles pour minimiser le temps de travail lié à la caractérisation temporelle des systèmes et des ICVs en découlant. La méthode dynamique de modélisation choisie explique aussi la négligence des caractéristiques spatiales puisqu'il s'agit d'une catégorie invariable à ce niveau.

La section 6.4 vient finalement décrire le résumé des conclusions du chapitre. Ces conclusions sont critiques à l'analyse générale de la pertinence des développements méthodologiques et permettent l'exploration de sujets qui ont été négligés jusque-là.

6.1 Sélection des cas d'études pour tester les développements

Les deux premiers sujets de la liste de la page précédente permettent de mieux comprendre l'utilité des cas d'études choisis et donc d'identifier les tests qui doivent être envisagés lors de la mise en œuvre des développements méthodologiques sur chacun des cas d'étude.

6.1.1 Choix du domaine de la production d'énergie par des sources renouvelables

L'introduction présente plusieurs statistiques soulignant l'importance de la variabilité spatio-temporelle des systèmes de production d'énergie. Il est aussi précisé que ces systèmes possèdent plusieurs ramifications dans l'activité humaine et font donc partie des processus utiles à la création des composantes nécessaires à la création d'installations de production d'énergie à partir de sources renouvelables. Il existe donc un lien plus ou moins important entre le système de production d'énergie global et la fabrication d'installations renouvelables (Reich et al. 2011). L'intérêt de considérer des spécificités spatiotemporelles dans la modélisation des systèmes de production d'énergie à partir de sources renouvelables s'explique donc, en partie, par ce lien.

Quelques études démontrent également l'importance de considérer des spécificités spatiales (Beloin-Saint-Pierre et al. 2009; de Wild-Scholten 2011; Mutel and Hellweg 2009; Reich et al. 2011; Seager et al. 2009; Yi et al. 2007) pour réaliser une étude ACV sur la production d'énergie. Pour ces études, la variabilité spatiale est importante surtout à cause de la disparité spatiale des ressources énergétiques renouvelables utilisées. La disparité temporelle des systèmes de production d'énergie et de leurs impacts environnementaux a été identifiée comme un enjeu clé par certains auteurs (Herfray and Peuportier 2012; Levasseur et al. 2010; Pehnt 2006). La considération des spécificités spatiotemporelles pour la modélisation des systèmes et des impacts est donc un sujet récurrent pour ce domaine ce qui confirme l'intérêt de ce type de système pour tester des développements servant à la considération de ses spécificités.

Pour résumé, l'intérêt marqué pour les sources d'énergie renouvelables dans la littérature sur la méthode ACV confirme la pertinence de ce type d'installation pour la mise en œuvre des nouveaux développements méthodologiques proposés dans ce document. Toutefois, il ne faut pas en arriver à la conclusion que ces développements, et les efforts accrus qu'ils requièrent lors de l'accomplissement d'une étude ACV, sont seulement justifiables pour ce domaine.

6.1.2 Choix des développements à tester

Les développements méthodologiques des chapitres 4 et 5 touchent différentes étapes de la modélisation ACV et une brève analyse de ceux-ci permet d'identifier comment le choix de cas d'études peut amener une discussion plus spécifique sur certains aspects de ces développements.

Evaluation du mode de caractérisation spatiotemporelle

Le mode de caractérisation spatiotemporelle retenu dans le chapitre 4 a été créé en fonction du cadre d'évaluation des modes de caractérisation qui a été défini pour répondre à différents critères et conditions (voir section 4.1). Le mode retenu respecte les conditions de viabilité comme l'indique l'analyse de la sous-section 4.3.1, mais la discussion sur la pertinence des modes par rapport aux critères gagne en clarté avec l'utilisation d'exemples. Il faut donc que les cas d'études permettent d'évaluer le potentiel de précision de la caractérisation et le temps de travail nécessaire pour la modélisation des processus du système.

Des discussions sur la précision spatiale utile à la modélisation des impacts environnementaux existent déjà dans la littérature et les choix à faire y sont suffisamment clairs (Mutel et al. 2011). La précision dans la caractérisation temporelle n'est toutefois pas encore un sujet qui est abordé dans les publications sur les études ACV dynamiques. Un des cas d'étude doit donc permettre d'évaluer l'effet de la précision de la caractérisation temporelle sur les résultats d'une étude. Cette discussion prend tout son sens lorsque des impacts environnementaux sont modélisés. Il faut donc faire cette discussion dans un exemple où les impacts environnementaux sont modélisés à partir d'un ICV caractérisé au niveau temporel.

Le critère du temps de travail du cadre d'évaluation des modes de caractérisation doit aussi être évalué à partir des cas d'études choisis comme exemples. Le temps de travail lié à la recherche d'information ne peut toutefois pas être évalué parce que les exemples sont construits à partir d'information existante et de caractéristiques spatiotemporelles arbitrairement choisies. Ces choix stratégiques ont été faits, au vu du temps imparti, pour la mise en œuvre d'une partie d'une étude ACV. Le temps de travail pour remplir les fiches de données peut être commenté pour tous les exemples choisis. Une évaluation du temps de travail pour la modélisation des systèmes caractérisés au niveau spatiotemporel est utile seulement pour des systèmes complexes puisqu'un système simplifié ne sera pas représentatif à ce sujet. La quantité de processus à définir doit être évaluée puisque cet aspect est aussi en lien avec la discussion sur la précision de la caractérisation temporelle.

Il faut finalement commenter comment la caractérisation spatiotemporelle des systèmes est définie en fonction des besoins de l'étude. Une discussion de ce type permet de mieux cerner comment la correspondance entre les caractéristiques spatiotemporelles des ICVs et les besoins des méthodes de modélisation d'impacts sont obtenus.

Evaluation de la méthode ESPA

Les cas d'études doivent surtout servir à expliquer, par des exemples, le fonctionnement de la méthode ESPA pour l'obtention d'ICVs caractérisés au niveau spatiotemporel. La section 5.2.3 décrit quelques caractéristiques des résultats attendus, mais la mise en oeuvre de cette méthode peut apporter des clarifications.

Correspondance entre ICVs et méthodes de modélisation d'impact

La section 5.2.3 discute aussi de l'utilisation d'ICVs caractérisés au niveau spatiotemporel pour la phase d'interprétation et d'analyse. Les cas d'études sont parfaits pour démontrer l'utilité de ce nouveau format de résultat par rapport à des résultats standards. Il faut donc discuter des avantages de ce nouveau format de résultats et comment ils peuvent être utilisés pour la modélisation des impacts environnementaux.

6.1.3 Intérêt pour la simplification des cas d'étude

La méthode ACV est complexe dans sa mise en œuvre à cause de tous les principes à respecter, toutes les phases et étapes à accomplir, toutes les méthodes à utiliser (calcul d'ICV et modélisation des impacts environnementaux) et surtout à cause de toutes les données à traiter. Couvrir tous ces aspects lors de cas d'études qui doivent servir à tester les nouvelles propositions d'un mode de caractérisation et d'une méthode de calcul d'ICV est superflu. La première simplification est donc de présenter seulement le travail de considération des spécificités spatiotemporelles qui est lié à la deuxième phase de la méthode ACV. Cette simplification ne permet cependant pas de discuter du lien entre l'ICV et la méthode de modélisation des impacts environnementaux et elle ne peut donc être utilisée pour les deux cas d'étude. Il est donc intéressant de commencer par un exemple simple qui ne nécessite pas la gestion d'une grande quantité d'information afin de pouvoir décrire le détail de chaque étape de la phase de modélisation des systèmes et du calcul de l'ICV.

Il est alors possible de décrire la caractérisation spatiotemporelle complète d'un système constitué de quelques processus avec peu de flux élémentaires et définir le détail du calcul de l'ICV pour ces quelques flux modélisés. Les observations et conclusions du premier exemple devront permettre d'écarter la discussion sur certains développements méthodologiques pour que le deuxième exemple puisse porter sur la mise en œuvre du mode de caractérisation et de la méthode de calcul d'ICV dans le cas d'un système complexe. La mise en œuvre des développements retenus doit se faire sur un système complexe pour faciliter l'évaluation de leurs performances sur le temps de travail. Une discussion sur le temps de travail pour la caractérisation spatiotemporelle n'est pas nécessairement simple à extrapoler et il convient de ne pas s'arrêter à un exemple avec peu de processus et de flux élémentaires.

6.1.4 Choix des cas d'étude

Les cas d'études (exemples de mise en œuvre) choisis permettent une discussion sur les différents aspects présentés dans les sous-sections précédentes. Tous ces aspects doivent être couverts par les cas d'étude, mais chacun répond à certains de ceux-ci plus spécifiquement et une description générale permet de définir une liste de sous-objectifs pour chacun des exemples.

Installation PV (cas d'étude #1)

Il s'agit d'un cas d'étude pour un système simplifié représentant la fabrication d'une installation photovoltaïque (PV). La faible quantité de processus considérés pour la modélisation du système permet de décrire tous les détails des étapes de caractérisation spatiotemporelle et du calcul d'ICV. Ce cas d'étude sert surtout à démontrer le fonctionnement du mode de caractérisation spatiotemporelle et de la méthode de calcul ESPA+ pour obtenir un ICV caractérisé au niveau spatiotemporel. Les résultats de ce cas d'étude démontrent l'intérêt de la méthode de calcul ESPA+ pour améliorer les capacités d'analyse à cause des nouvelles informations disponibles dans l'ICV.

Installations solaires thermiques pour la production d'eau chaude sanitaire (cas d'étude #2)

Ce cas d'étude porte sur des systèmes complexes déjà évalués via la méthode ACV standard dans l'étude ESTHACE I (Adra *et al.* 2009). Il propose, non seulement une caractérisation des systèmes et ICVs, mais aussi la modélisation dynamique d'impacts à partir de la méthode proposée par Levasseur et al (2010). L'évaluation environnementale du potentiel de l'empreinte carbone de ces différents scénarios diminue toutefois la pertinence d'une considération des spécificités spatiales. C'est pourquoi seules les spécificités temporelles seront caractérisées dans ce cas d'étude. La complexité des systèmes permet une analyse plus représentative des défis de mise en œuvre des considérations de spécificités temporelles lors de l'accomplissement d'une étude ACV contemporaine. Les résultats de la modélisation dynamique des impacts permettent aussi une discussion sur des notions plus avancées qui n'ont pas nécessairement été couvertes dans les chapitres précédents.

6.2 Cas d'étude #1 : Installation photovoltaïque simplifiée

Ce premier cas d'étude présente le scénario simple décrivant quelques processus reliés à la fabrication d'une installation PV. La simplicité du scénario n'est pas représentative du détail des études ACV contemporaines, mais permet de faire une description détaillée. L'objectif principal de ce cas d'étude est alors de démontrer qu'il est possible d'obtenir un ICV désagrégé au niveau spatiotemporel avec les différents développements proposés dans les chapitres 4 et 5. Ce scénario a aussi été le sujet de deux communications sur la méthode ESPA (Beloin-Saint-Pierre and Blanc 2011a, 2011b).

6.2.1 Description générale du scénario

Le scénario choisi décrit la fabrication d'une installation PV de 3 kW_c[i] de puissance et de technologie silicium monocristallin (mc-Si). L'information utilisée pour décrire ce scénario provient directement de la BDD ecoinvent v.2.2[ii]. Peu de valeurs ont été modifiées par rapport à celle de la BDD,[iii] mais des caractéristiques spatiotemporelles ont été ajoutées pour évaluer le potentiel d'utilisation du mode de caractérisation spatiotemporelle retenu. Le schéma de la figure 6.1 présente les sept différents processus considérés dans ce cas d'application. Le processus de fabrication de l'installation PV (Installation PV) est considéré comme étant sur le niveau 0 du système. Les six autres « sous-processus » sont considérés comme étant sur le niveau 1 du système. Tous les processus qui sont sur des niveaux subséquents sont négligés. Il s'agit alors d'un système « simpliste » à seulement deux niveaux et ce parti pris de modélisation explique pourquoi il est possible d'arrêter le calcul de l'ICV au deuxième terme de la série (voir sous-section 6.2.3).

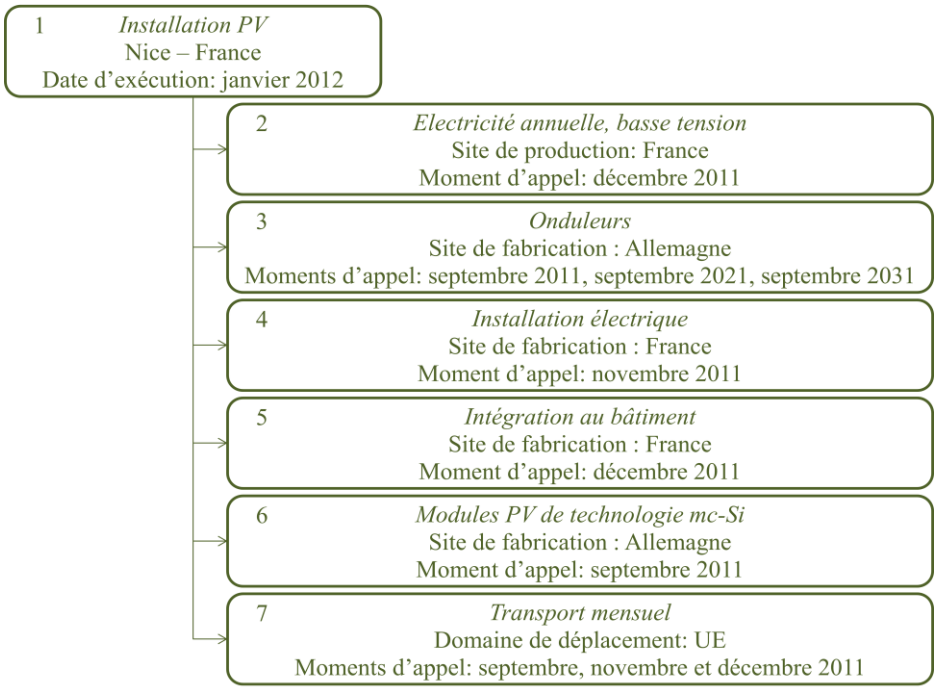


Figure 6.1 : Schéma décrivant les processus considérés pour le système représentant la fabrication d'une installation PV de 3 kW_c de puissance et de technologies silicium monocristallin (mc-Si). Les processus des niveaux « inférieurs » du système sont négligés dans cet exemple.

[i] Le kW_c est une unité standard pour définir le nombre de kilowatts de puissance qu'une installation PV produit lorsqu'elle subit une irradiation de 1000 Watt/m^2 avec un spectre 1,5. Elle se nomme kilowatt crête.
[ii] Le nom du processus utilisé est : 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted, on roof/CH/I U.
[iii] Le nombre d'onduleurs est passé de 2,4 à 3 et seul un flux de transport de 150 T·km en Europe a été retenu.

Il est intéressant de noter que l'hypothèse de durée de vie de 10 ans pour un onduleur est traduite, dans ce système, par l'appel de 3 onduleurs sur la durée de vie de 30 ans de l'installation PV. Il s'agit toutefois d'une hypothèse faite dans une modélisation standard du système. L'hypothèse spécifique à la modélisation dynamique du système va plus loin en proposant que les 3 onduleurs sont appelés à intervalle régulier de 10 ans sur le cycle de vie du scénario. Cette hypothèse est nécessaire pour la caractérisation temporelle, mais il faut se poser des questions sur la représentativité de cette modélisation (voir sous-section 6.2.5).

Un seul flux élémentaire est modélisé dans ce système et il s'agit de l'émission de chaleur dans l'air provenant des différents processus modélisés. Ce flux élémentaire a été choisi puisqu'il était présent dans plusieurs définitions de processus du système, mais il ne s'agit pas d'un flux ayant un impact important sur l'environnement. Ce choix de flux élémentaire est donc surtout stratégique pour présenter plusieurs exemples de définition de distributions temporelles de flux élémentaires.

Le scénario « simplifié » présente deux autres caractéristiques à considérer :

- La précision spatiale des processus est à un niveau à l'échelle d'un pays;
- La précision temporelle des flux de processus et élémentaire est d'un niveau mensuel.

6.2.2 Utilisation du mode de caractérisation spatiotemporelle

L'utilisation du mode de caractérisation spatiotemporelle est décrite dans cette section par la définition de certaines informations qui se retrouvent dans les fiches de données qui constituent une BDD. Tous les flux (de processus et élémentaires) qui sont considérés dans le système décrit par la figure 6.1, sont définis et liés aux caractéristiques spatiotemporelles qui doivent être propagées à l'ICV caractérisé au niveau spatiotemporel.

Définition des fiches de données – caractérisation spatiotemporelle du système

Le tableau 6-1 décrit partiellement la fiche de données nécessaire à la modélisation du processus de fabrication d'une installation PV. Les différentes distributions temporelles décrivant les flux sont présentées séparément dans l'annexe 10. Seule la distribution temporelle d'appel des onduleurs ($f_{p2}(t)$) est présentée dans la figure 6.2 (p. 6-7) pour donner un exemple spécifique d'une caractérisation temporelle à partir des informations données dans la figure 6.1.

Tableau 6-1 : Description des flux de processus et élémentaires définissant partiellement une fiche de données décrivant le processus de fabrication d'une installation PV de 3 kW_c et de technologie mc-Si.

Description des flux (de processus et élémentaire) dans une fiche de données – Niveau 0 du système					
Flux de processus					
Nom		Région		Distribution temporelle	Unité
Electricité annuelle, basse tension		France		$f_{p1}(t)$	kWh
Onduleurs		Allemagne		$f_{p2}(t)$	Quantité
Installation électrique		France		$f_{p3}(t)$	Quantité
Intégration au bâtiment		France		$f_{p4}(t)$	Quantité
Modules PV de technologie mc-Si		Allemagne		$f_{p5}(t)$	m^2
Transport mensuel		EU		$f_{p6}(t)$	T·km
Flux élémentaire					
Nom	Région	Compartiment	Sous-compartiment	Distribution temporelle	Unité
Chaleur	France	Air	---	$f_{e0}(t)$	MJ

La figure 6.2 présente la distribution représentant l'appel d'onduleurs (flux de processus) sur la durée de vie de l'installation PV. La précision temporelle de cette distribution est mensuelle ce qui veut dire que la discrétisation de la distribution se fait pour chaque mois sur la durée de vie de l'installation PV.

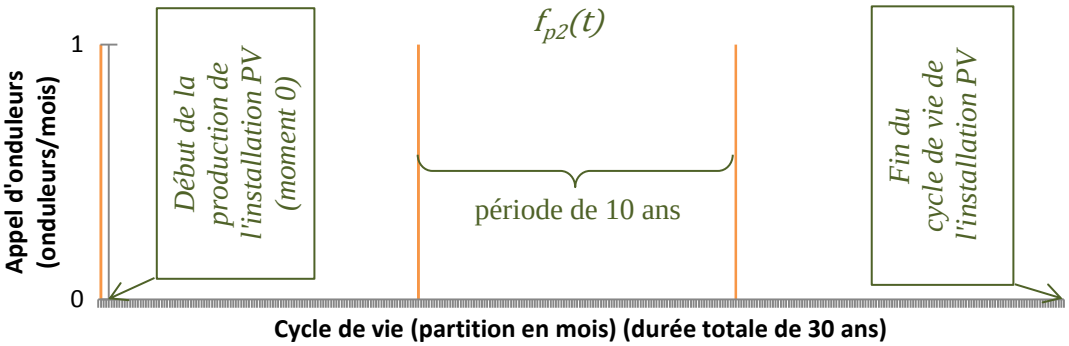


Figure 6.2 : Distribution temporelle de l'appel d'onduleurs sur le cycle de vie de l'installation PV ($f_{p2}(t)$). Le temps 0 de cette distribution est fixé par rapport au moment de mise en fonction de l'installation qui est le mois de janvier 2012 dans ce scénario.

Les six « sous-processus » du système défini dans la figure 6.1 ne sont liés à aucun autre processus. Leurs définitions dans une fiche de données ne nécessitent donc pas une description de flux de processus, mais seulement des flux élémentaires. C'est pourquoi ils sont tous réunis dans le tableau 6-2 avec une description spatiotemporelle portant seulement sur les émissions de chaleur.

Tableau 6-2 : Description spatiotemporelle des flux élémentaires des « sous-processus » du système décrit par la figure 6.1. Les processus : installation électrique et intégration au bâtiment ne sont liés à aucune émission de chaleur ce qui explique leur absence dans la description de ces portions de fiches de données.

Flux élémentaires des sous-processus du système – niveau 1 du système					
Electricité annuelle, basse tension					
Nom	Région	Compartiment	Sous-compartiment	Distribution temporelle	Unité
Chaleur	France	Air	---	$f_{e1}(t)$	MJ
Onduleurs					
Nom	Région	Compartiment	Sous-compartiment	Distribution temporelle	Unité
Chaleur	France	Air	---	$f_{e2}(t)$	MJ
Modules PV de technologie mc-Si					
Nom	Région	Compartiment	Sous-compartiment	Distribution temporelle	Unité
Chaleur	France	Air	---	$f_{e5}(t)$	MJ
Transport mensuel					
Nom	Région	Compartiment	Sous-compartiment	Distribution temporelle	Unité
Chaleur	France	Air	---	$f_{e6}(t)$	MJ

Toutes les fonctions de distributions des émissions de chaleur dans l'air décrites dans le tableau 6-2 sont présentées à l'annexe 10. Leurs temps 0 est fixé par rapport aux processus auxquels elles sont liées comme le requiert le mode de caractérisation spatiotemporelle retenu.

Analyse de l'application du mode de caractérisation pour la modélisation du système

Plusieurs commentaires ont été faits sur les deux critères d'évaluation (temps de travail et potentiel de précision) des modes de caractérisation spatiale et temporelle dans le chapitre 4. Les conclusions de ces discussions sont maintenant comparées avec les résultats de la mise en œuvre de la caractérisation dans ce cas d'étude.

Précision de la caractérisation spatiotemporelle

La précision optimale de la caractérisation spatiotemporelle se définit en fonction des objectifs d'une étude ACV et des méthodes de modélisation des impacts environnementaux qui sont utilisées. Le cas d'étude présent ne propose justement pas d'objectifs clairs, et ne modélise pas les impacts environnementaux. Il est donc peu utile de faire une discussion sur la pertinence du niveau de précision de la caractérisation dans ce cas d'étude.

Il faut toutefois noter que le niveau de précision temporelle de tous les flux du système est le même. Cette situation facilite le calcul d'ICV puisqu'il n'est pas nécessaire de faire d'hypothèses pour accomplir les produits de convolution entre les distributions temporelles relatives qui représentent ces flux de processus et élémentaires.

Temps de travail pour la caractérisation spatiotemporelle du système modélisé

Le temps de travail nécessaire pour remplir la caractérisation spatiotemporelle des fiches de données est faible par rapport à la création globale d'une fiche de données. Ce temps de travail est en fait équivalent au temps nécessaire pour décrire les tableaux et annexes référencé dans cette section, ce qui équivaut à quelques minutes de travail. La recherche de cette information spatiotemporelle aurait été plus coûteuse en temps s'il s'agissait de l'étude d'une vraie installation PV.

Le temps de travail nécessaire pour la modélisation du système est, pour ce cas d'étude, équivalent à celui d'une étude ACV contemporaine. En effet, l'organisation des processus en un système ne requiert pas une gestion de la caractérisation spatiotemporelle si les règles du mode de caractérisation sont respectées en ce qui concerne la caractérisation temporelle. Il devient évident que le temps de travail pour la modélisation du système ne sera pas affecté par l'utilisation d'informations caractérisées au niveau spatiotemporel peu importe la complexité du système.

6.2.3 Calcul à partir de la méthode ESPA

Les différentes informations présentées dans les tableaux 6-1 et 6-2 doivent maintenant servir au calcul de l'ICV caractérisé au niveau spatiotemporel. Pour faire ce calcul d'ICV, il faut reprendre l'équation 5.7 qui est décrite à nouveau ci-dessous :

$$\vec{v} = \mathbf{E} *_\tau (\mathbf{I} + \mathbf{T} + \mathbf{T} *_\tau \mathbf{T} + \cdots) *_\tau \vec{r} \qquad \text{équation 5.7}$$

Il existe seulement deux niveaux dans le système défini par la figure 6.1 et l'équation 5.7 se transforme donc comme suit pour le cas d'étude actuel :

$$\vec{v} = \mathbf{E} *_\tau \vec{r} + \mathbf{E} *_\tau \mathbf{T} *_\tau \vec{r} \qquad \text{équation 6.1}$$

Sous un format matriciel, l'équation 6.1 devient pour ce système :

Niveau 0

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} f_{e0}(t) & f_{e1}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_{e2}(t) & 0 & 0 & f_{e5}(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{e6}(t) \end{bmatrix} *_\tau \begin{bmatrix} f_{p0}(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

équation 6.2

Niveau 1

$$+ \begin{bmatrix} f_{e0}(t) & f_{e1}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_{e2}(t) & 0 & 0 & f_{e5}(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{e6}(t) \end{bmatrix} *_\tau \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{p1}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{p2}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{p3}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{p4}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{p5}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{p6}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} *_\tau \begin{bmatrix} f_{p0}(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dans cette équation, la matrice environnementale **E** se divise en trois lignes puisque le système est désagrégé au niveau spatial en 3 régions différentes (France, Allemagne et Europe) pour un seul type de flux élémentaire (chaleur émise dans l'air). Une plus grande précision sur la caractérisation spatiale imposerait des lignes supplémentaires pour les dimensions de la matrice environnementale **E**. La désagrégation spatiale et temporelle n'aura toutefois aucun effet sur les dimensions de la matrice technologique **T** et du vecteur de référence $\vec{r}$.

La matrice technologique **T** de l'équation 6.2 est constituée de plusieurs colonnes avec des valeurs nulles. Cette situation est particulière au système de ce cas d'étude et s'explique par l'existence d'un seul niveau de sous-processus dans celui-ci. Il ne s'agit toutefois pas d'une situation standard.

Il est aussi intéressant de noter que la troisième région (Europe) englobe les deux autres (France et Allemagne) ce qui veut dire que tous les flux pourraient être compilés pour cette région. Toutefois, une telle agrégation serait équivalente à la perte de la caractérisation spatiale pour ce cas d'étude. Il ne faut pas non plus distribuer une part des flux élémentaires en Europe vers les régions France et Allemagne même s'il est certain que ceux-ci ont lieu, au moins en partie, dans ces régions. En d'autres mots, il est utile de conserver le niveau de caractérisation spatiale décrit dans les fiches de données pour être capable d'identifier les flux élémentaires qui sont peu précis, au niveau spatial, dans la description du système.

L'équation 6.2 permet la description d'un flux de chaleur dans l'air pour 3 régions différentes (France, Allemagne et Europe) et les distributions temporelles décrivant ces flux sont données par les équations suivantes :

$$v_{France} = \left(f_{e0}(t) + f_{e1}(t) *_\tau f_{p1}(t)\right) *_\tau f_{p0}(t)$$

équation 6.3

$$v_{Allemagne} = \left(f_{e2}(t) *_\tau f_{p2}(t) + f_{e5}(t) *_\tau f_{p5}(t)\right) *_\tau f_{p0}(t)$$

équation 6.4

$$v_{Europe} = \left(f_{e6}(t) *_\tau f_{p6}(t)\right) *_\tau f_{p0}(t)$$

équation 6.5

6.2.4 Résultats

Les résultats des équations 6.3, 6.4 et 6.5 sont présentés, sous forme de distributions temporelles, dans la figure 6.3 avec un repère lié au cycle de vie de l'installation PV. Ce repère est en lien avec le temps 0 du résultat d'ICV caractérisé au niveau spatiotemporel. L'ICV caractérisé au niveau spatiotemporel se divise donc en 3 lignes qui différencient les régions d'émissions de chaleur dans l'air (représenté par 3 couleurs différentes dans la figure 6.3).

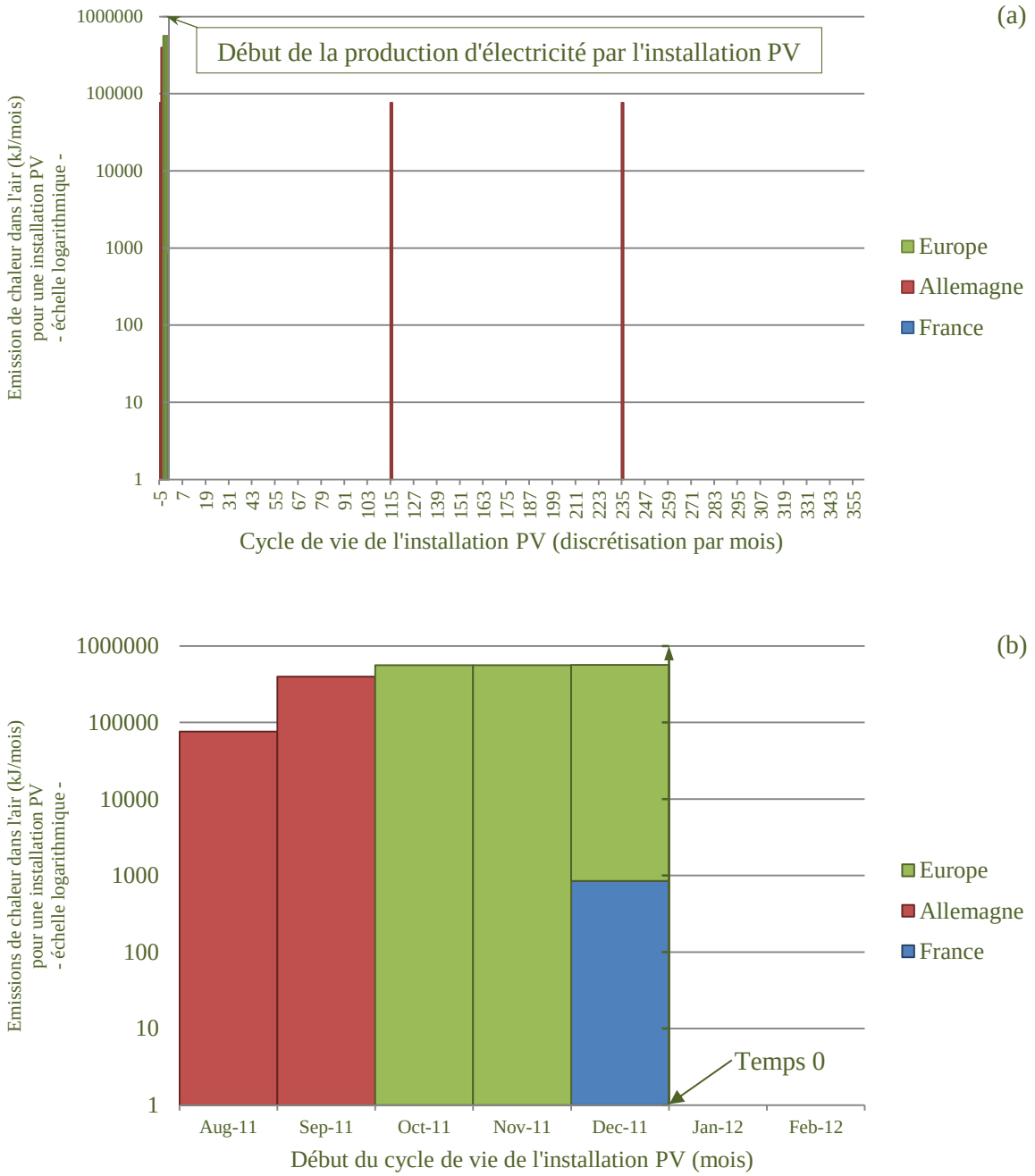


Figure 6.3 : Distributions temporelles représentant les résultats de l'ICV caractérisé au niveau spatiotemporel. Le graphique (a) présente les résultats de l'ICV caractérisé au niveau spatiotemporel sur tout le cycle de vie du système de l'installation PV. Le graphique (b) présente tous les flux élémentaires de chaleur dans l'air avant le début de la production d'électricité par l'installation. Ce graphique sert aussi à faire un zoom pour préciser une partie du graphique (a). Il est important de noter que l'échelle utilisée est logarithmique.

6.2.5 Analyse des résultats

Plusieurs remarques peuvent être faites sur les résultats présentés dans la figure 6.3. Il faut tout d'abord confirmer que l'agrégation (intégration) sur le temps et l'espace permet d'obtenir un résultat équivalent à celui qui serait obtenu par un calcul d'ICV traditionnel (231 MJ/installation). Il faut aussi indiquer que la division de l'information en trois régions et un cycle de vie divisé par une période mensuelle n'est pas le seul format qui peut être utilisé. Il est, par exemple, possible de présenter des distributions temporelles pour les flux élémentaires de chaque processus du système s'il s'agit du type d'information recherché. Un ICV divisé par processus indiquerait, pour ce cas d'étude, que le transport en Europe des différentes composantes de l'installation PV est le processus responsable de la plus grande proportion des émissions de chaleur dans l'air sur le cycle de vie complet de l'installation.

Les caractéristiques spatiotemporelles des résultats du calcul d'ICV offrent des informations utiles à l'analyse de ceux-ci. Ces informations étaient auparavant difficiles à valider dans un calcul d'ICV traditionnel puisqu'elles n'étaient pas directement liées aux résultats, mais seulement décrites dans les BDDs utilisées comme source d'information. Voici deux exemples d'information pertinente pour l'analyse du système :

1. Les résultats de la figure 6.3 (a) démontrent bien qu'une majorité des émissions de chaleur dans l'air a eu lieu dans le passé (avant septembre 2012). Il faut donc en arriver à la conclusion que la recherche de solutions pour diminuer les émissions futures de chaleur dans l'air de cette installation n'a que peu d'intérêt d'un point de vue cycle de vie.
2. Il faut aussi remarquer que la majorité des émissions de chaleur dans l'air ont lieu dans la région Europe. Ceci étant dit, toutes les émissions répertoriées pour ce système ont lieu en Europe (France, Allemagne et Europe). Il n'est donc pas possible d'identifier les points critiques d'émissions au niveau spatial à partir des informations utilisées. Les résultats de cet ICV caractérisé au niveau spatiotemporel indiquent donc que l'information spatiale n'est pas assez précise pour identifier la région qui subit une grande proportion des émissions de chaleur dans l'air. Il serait alors pertinent de revenir à la phase de caractérisation spatiale des flux du système.

Le traitement de ce cas d'étude souligne toutefois deux problèmes sur lesquels il faudra porter une attention particulière pour la caractérisation temporelle. En reprenant l'information de la figure 6.2, il devient clair que la caractérisation temporelle requiert deux hypothèses importantes. La première hypothèse concerne l'utilisation du même processus de fabrication d'onduleurs sur la durée de vie de l'installation. La deuxième hypothèse concerne la durée de vie des onduleurs pour le positionnement des flux de processus sur le cycle de vie de l'installation.

Hypothèse sur la période de validité des processus

Cet aspect a déjà été traité dans la discussion du chapitre 4. En effet, l'appel d'un même processus sur une longue période (environ 20 ans ici) indique que l'analyste, responsable de la modélisation du système, fait l'hypothèse que ce processus de fabrication d'onduleurs ne variera pas sur cette période. Il faut donc bien connaître la vitesse d'évolution des technologies des processus utilisés.

Hypothèse sur la durée de vie d'une composante

Dans ce système, c'est l'hypothèse d'une durée de vie de 10 ans pour un onduleur qui permet d'établir un appel de nouvel onduleur après 10 ans. Toutefois, la durée de vie d'un onduleur n'est pas toujours de 10 ans et varie de manière plus importante que la discrétisation mensuelle utilisée ici. Il faut donc en arriver à la conclusion que la caractérisation temporelle peut amener un nouveau degré d'incertitude puisqu'il faut faire des hypothèses plus ou moins représentatives sur l'appel de processus dans le temps. Il semble aussi utile de trouver un moyen pour caractériser cette incertitude sur le moment d'appel de nouveaux onduleurs sur le cycle de vie de l'installation.

6.3 Cas d'étude #2 : Installation solaire thermique

Le premier cas d'étude (section 6.2) a permis de faire une description détaillée de l'utilisation du mode de caractérisation spatiotemporelle et de la méthode ESPA pour le calcul d'un ICV caractérisé au niveau spatiotemporel à partir d'un système très simple. Le deuxième cas d'étude présenté dans cette section présente maintenant comment ce mode et cette méthode peuvent être appliqués à un système plus complexe. Les résultats de l'ICV caractérisé au niveau spatiotemporel sont ensuite utilisés comme données d'entrées pour la modélisation dynamique des gaz à effet de serre à partir de la méthode de modélisation proposée par Levasseur et al (2010).

La mise en œuvre des développements méthodologiques dans ce cas d'étude permet une analyse plus poussée sur le temps de travail pour la modélisation du système et de la gestion d'une précision variable. Il s'agit d'un exemple concret permettant d'établir la correspondance entre un ICV caractérisé au niveau spatiotemporel et une méthode d'impact considérant la variabilité temporelle des impacts.

6.3.1 Description générale du cas d'étude

L'objectif de ce deuxième cas d'étude est de faire une comparaison du potentiel de réchauffement climatique de différents scénarios de production d'eau chaude sanitaire (ECS) en considérant les spécificités temporelles des moments d'émissions de GES par rapport à un horizon de 100 ans. Une évaluation traditionnelle avec la méthode de modélisation du GIEC sur 100 ans (v.1.02)[i] est aussi effectuée à des fins de comparaison des résultats.

Caractéristiques générales

La liste suivante présente les caractéristiques générales de ce cas d'étude :

- Le cycle de vie considéré pour la production d'ECS est arbitrairement fixé à 80 ans
  - Allant de janvier 2011 à décembre 2091
- La moyenne annuelle de consommation journalière d'ECS est estimée à 140 litres
  - Estimation de la consommation d'une famille de quatre personnes
- Le taux de couverture solaire[ii] retenu pour les installations solaires thermiques (ST) est de 66%
- La température de l'ECS dans le réservoir est fixée à 60°C
- L'emplacement choisi pour le bâtiment est la ville de Lyon en France
  - Irradiation annuelle moyenne est de 1440 kWh/m^2 (pour une inclinaison de 30º)
- La durée de vie des installations produisant de l'ECS est estimée à 20 ans
- Deux hypothèses sur l'efficacité énergétique des installations sont proposées
  - Perte d'efficacité annuelle de 0,1%
  - Gain de 1% de l'efficacité des installations lors des rénovations tous les 20 ans

Scénarios du cas d'étude

Ce cas d'étude évalue quatre scénarios de production d'ECS. La distinction entre les scénarios dépend des sources d'énergie utilisées. La liste suivante présente les différents scénarios retenus :

1. Installation traditionnelle utilisant seulement du gaz naturel pour chauffer l'eau (*I-GN*)
2. Installation traditionnelle utilisant seulement de l'électricité pour chauffer l'eau (*I-EL*)
3. Installation ST avec un appoint au gaz naturel (*I-ST+GN*)
4. Installation ST avec un appoint électrique (*I-ST+EL*)

[i] http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm

[ii] Le taux de couverture solaire se définit comme la part des besoins annuels en énergie couverts par l'énergie solaire. Formule de calcul: Couverture Solaire = production d'énergie à partir de l'installation solaire / Besoins énergétiques.

Ces scénarios doivent permettre une étude comparative. Il est alors suffisant de considérer seulement les processus qui diffèrent entre ces scénarios. Toutefois, les résultats qui sont obtenus ne peuvent être comparés avec d'autres études plus globales.

Sources d'information

La base de données ecoinvent 2.0 est la première source d'information utilisée pour décrire les différents processus nécessaires à la production d'ECS en fonction des différents scénarios. La liste suivante présente les processus utilisés comme proxy pour représenter les différents systèmes liés aux différents scénarios.

Installation traditionnelle, 100% gaz naturel (I-GN)

Le processus retenu comme proxy pour modéliser les différences de cette catégorie de scénario est : *Natural gas, burned in boiler condensing modulating < 100 kW/RER U* tel que disponible dans la BDD ecoinvent 2.0.

Installation traditionnelle, 100% électrique (I-EL)

Les processus : *Auxiliary heating, electric, 5kW, at plant/FR/I U* et *Electricity, low voltage, production FR, at grid/FR U* sont retenu comme proxys pour modéliser les spécificités de ce scénario. Ces processus sont aussi disponibles dans la version 2.0 de la BDD ecoinvent. Il faut toutefois modifier les proportions de sources d'énergie utilisées pour le mix énergétique afin de mettre à jour les données de production standard pour 2012 en France à partir des données de RTE (2011). Les statistiques utilisées représentent la production de 2010 et servent pour la modélisation de la production sur les 80 ans du cycle de vie considéré.

Installation ST avec gaz naturel en appoint (I-ST+GN)

La modélisation des systèmes pour ce scénario requiert tout d'abord le même processus que pour la catégorie I-GN afin de modéliser l'appoint. Seule la quantité de consommation d'énergie thermique sera différente.

Il faut ajouter à cette information, une description des différentes composantes d'une installation ST. Voici la liste des composantes à considérer :

- Plomberie supplémentaire entre l'installation ST et le système de chauffage de l'eau
- La station solaire
- Le fluide caloporteur
- Les dispositifs de régulation solaire (gestion des changements de température et pression)
- Le vase d'expansion
- Les modules solaires thermiques
- La structure d'intégration des modules à la toiture du bâtiment.

Les descriptions spécifiques de ces composantes sont disponibles dans le rapport du projet ESTHACE 1 (Adra *et al.* 2009).

Installation ST avec électricité en appoint (I-ST+EL)

Les sources d'information utilisées pour décrire les systèmes de ce scénario sont une combinaison d'une partie des informations utilisées pour les scénarios *I-EL* et *I-ST+GN*. Il faut donc utiliser les descriptions des composantes d'une installation ST qui ne diffère pas en fonction des différentes catégories d'installations ST. Il faut ensuite ajouter les descriptions de la production d'électricité et du système auxiliaire à celles des composantes. Comme pour la catégorie de l'*I-ST+GN*, c'est la quantité d'énergie consommée qui différencie les scénarios *I-ST+EL* de *I-EL*.

6.3.2 Modélisation des systèmes

La consommation énergétique des installations produisant l'ECS a déjà été identifiée comme un vecteur important du potentiel de réchauffement climatique lié à la production d'ECS (Adra *et al.* 2009). L'étude ESTHACE I présente cependant des résultats équivalents au niveau du potentiel de réchauffement climatique de certains scénarios[i] et cette équivalence complique le choix des décideurs pour favoriser un type d'installation ST. Il a donc été jugé pertinent de détailler la variation temporelle de la production d'électricité en France pour évaluer son influence sur le potentiel de réchauffement climatique des deux scénarios liés à une consommation d'électricité. Les données statistiques de RTE (2011) sur la variation annuelle et mensuelle de l'année 2010[ii] sont donc utilisées pour la modélisation des catégories de scénarios *I-EL* et *I-ST+EL*.

Variabilité temporelle des systèmes – consommation d'ECS

Toutes les caractéristiques définies dans la sous-section 6.3.1 permettent d'évaluer la consommation énergétique pour la production d'ECS sur le cycle de vie des scénarios. Les prévisions de consommation moyenne d'ECS sont équivalentes à une consommation énergétique de 2850 kWh pour l'année 2012 qui sert de consommation de référence. Une évaluation annuelle des consommations d'ECS ne permet cependant pas de considérer la variabilité de consommation d'ECS durant l'année. Cette spécificité est potentiellement importante dans l'évaluation des scénarios *I-EL* et *I-ST+EL* puisque l'empreinte carbone du mix électrique français varie de manière importante selon les mois de l'année[iii]. Il devient alors intéressant d'évaluer la variabilité des résultats des différents scénarios en fonction d'un cas extrême de consommation mensuelle d'ECS sur une année.

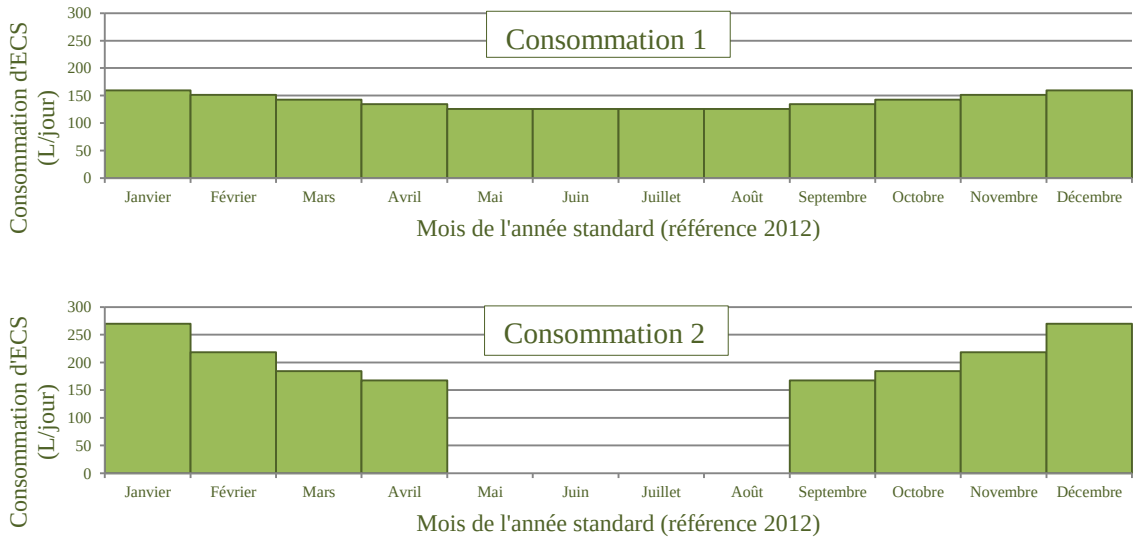


Figure 6.4 : Distributions représentant deux scénarios de variation de la consommation journalière moyenne d'ECS en fonction des mois pour l'année 2012 de référence.

[i] L'empreinte carbone du litre d'ECS pour les scénarios *I-EL* et *I-ST+GN* (avec une couverture solaire de 66%)
[ii] Il s'agit de l'année choisie pour décrire les statistiques de production.
[iii] Voir annexe 11 pour confirmation de cet énoncé

La figure 6.4 (voir page 6-14) présente, par des distributions temporelles relatives, deux possibilités de variation mensuelle de la consommation journalière d'ECS. La première distribution est représentative d'une consommation typique pour une maison habitée toute l'année. Dans ce scénario, la variabilité annuelle ne dépasse pas les 23%. La deuxième distribution représente un scénario de type chalet alpin qui est habité pendant les mois où il est possible de faire du ski. La variabilité annuelle est, dans ce scénario, beaucoup plus importante puisque la consommation est nulle pour les mois d'été et plus importante en hiver par rapport au premier scénario. Ces deux distributions imposent la création de deux nouveaux scénarios reflétant une précision mensuelle dans la modélisation des systèmes. Seule l'année de référence est représentée puisque la consommation d'ECS est considérée comme invariable sur les 80 ans du cycle de vie pour tous les scénarios.

Variabilité temporelle des systèmes – consommation d'énergie thermique

Il faut ensuite transformer la modélisation de consommation d'ECS en distribution de consommation d'énergie thermique pour identifier comment modéliser les systèmes de production d'énergie. Ces distributions dépendent des pertes et gains d'efficacité des installations sur le cycle de vie considéré.

Installation 100% gaz naturel (I-GN) et 100% électricité (I-EL)

Une hypothèse de perte de 18,3% de l'énergie thermique produite est retenue pour modéliser la transformation de chaleur en ECS à 60°C dans un réservoir. La figure 6.5 présente la distribution de consommation d'énergie thermique correspondante à la consommation mensuelle d'ECS décrite par la première distribution de la figure 6.4. La figure 6.5 représente la consommation sur le cycle de vie complet de 80 ans avec une discrétisation mensuelle.

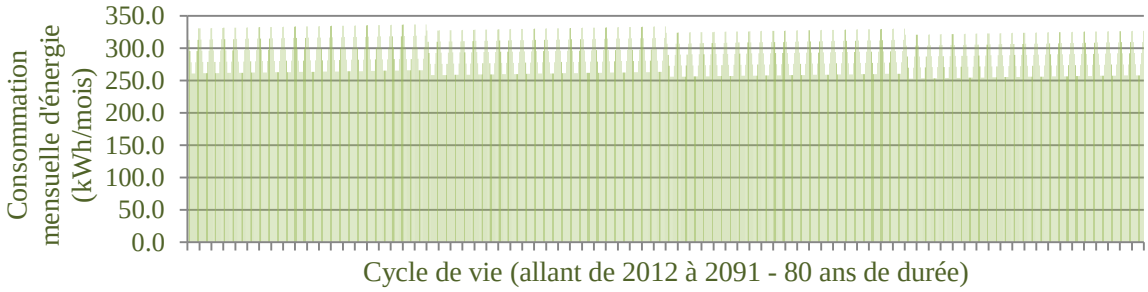


Figure 6.5 : Consommation d'énergie thermique provenant du gaz ou de l'électricité pour le chauffage de l'ECS tous les mois sur le cycle de vie des scénarios des catégories *I-GN* et *I-EL*. Ces valeurs dépendent de la consommation d'ECS définie à la figure 6.4 et des pertes et gains énergétiques des installations.

Installation ST avec gaz naturel en appoint (I-ST+GN) et ST avec électricité en appoint (I-ST+EL)

La perte d'efficacité choisie pour les scénarios des deux catégories sans installation ST est aussi retenue pour les installations ST (avec appoint). Le choix arbitraire de 66% de couverture solaire permet le calcul de l'apport annuel d'énergie provenant de l'irradiation solaire. Cette valeur est importante pour dimensionner les installations ST et la quantité d'énergie provenant de l'appoint. La figure 6.6 présente la distribution de consommation d'énergie thermique correspondante à la consommation mensuelle d'ECS décrite par la première distribution de la figure 6.4. La discrétisation mensuelle est encore retenue.

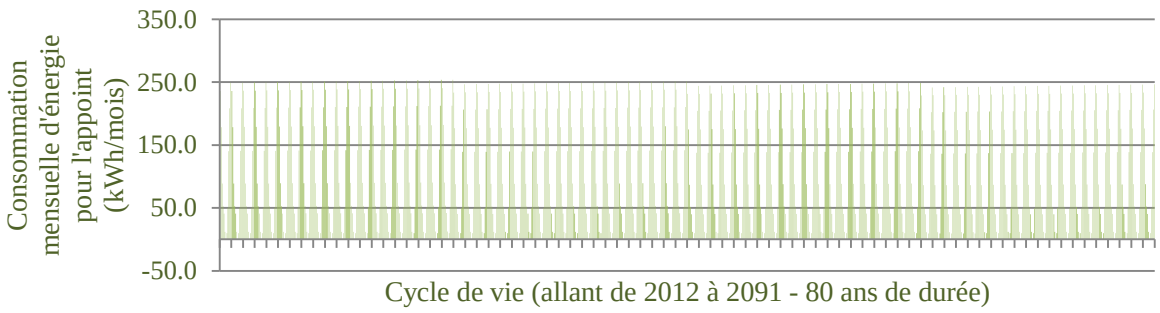


Figure 6.6 : Consommation d'énergie thermique provenant du gaz ou de l'électricité pour le chauffage de l'ECS à tous les mois sur le cycle de vie des scénarios des catégories *I-ST+GN* et *I-ST+EL*. Ces valeurs dépendent de la consommation d'ECS définie à la figure 6.4, des pertes, des gains énergétiques des installations et de la couverture solaire fixée à 66%.

Caractérisation temporelle du système complet

La consommation d'énergie thermique ne définit qu'une partie des systèmes à modéliser pour l'évaluation du potentiel de réchauffement climatique des différents scénarios. Ces systèmes sont en fait constitués par une multitude de processus qui sont décrits dans ecoinvent 2.0. La caractérisation temporelle requiert alors un temps de travail beaucoup plus important que celui accordé à la modélisation du système du premier cas d'étude. Certaines décisions doivent donc être prises pour simplifier l'étape de la caractérisation temporelle de ces flux de processus et élémentaires. Ces décisions doivent aussi considérer le besoin d'une précision mensuelle pour certains scénarios liés à une consommation d'électricité.

La complexité du système empêche aussi la description des fiches de données dans ce document. Une annexe devrait comprendre plus de 200 fiches de données pour décrire la caractérisation temporelle comme dans la section précédente ce qui n'est pas utile, ni envisageable.

La modélisation des systèmes liés aux scénarios de ce cas d'étude requiert donc certaines décisions sur la précision de la caractérisation temporelle et certaines hypothèses pour minimiser la quantité de données à traiter. Ces deux aspects sont décrits ici en détail.

Précision temporelle

La précision temporelle de la méthode de modélisation dynamique du réchauffement climatique de Levasseur et al (2010) requiert une précision temporelle annuelle. Il semble donc logique de décrire les flux élémentaires avec une telle précision pour obtenir un ICV qui offre des valeurs avec un niveau de précision correspondant à la méthode de modélisation dynamique. C'est pourquoi tous les flux élémentaires des systèmes sont caractérisés avec une précision annuelle.

Les scénarios décrivent cependant certains systèmes (*I-EL* et *I-ST+EL*) dont la variation mensuelle peut avoir une incidence sur les résultats. Une caractérisation temporelle mensuelle de ces systèmes est donc accomplie. Des précisions mensuelle et annuelle sont retenues pour la modélisation de ces systèmes afin de pouvoir évaluer s'il y aura une différence dans les résultats et, si c'est le cas, l'importance de cette différence dans les conclusions du cas d'étude.

Hypothèses simplificatrices

Décrire les caractéristiques temporelles des différents systèmes représentant les différents scénarios requiert, selon le mode choisi précédemment, la définition de distributions temporelles pour tous les flux de processus et élémentaires des différents processus de tous les systèmes. L'information provenant de la BDD ecoinvent v.2.0 qui sert à la description de ces systèmes compte plus de 2000 processus. Il est donc impossible, dans le temps disponible pour cette étude, de caractériser ces milliers de flux. Plusieurs choix ont donc été faits pour simplifier l'étape de caractérisation des systèmes.

Simplification pour les flux élémentaires

Le premier choix a été de ne considérer que les flux élémentaires qui sont en lien avec la catégorie d'impact permettant d'évaluer le potentiel de réchauffement climatique d'un système. Les flux de CO_2, de N_2O, de méthane (CH_4), d'éthane (C_2H_6) et de tetrafluorométhane (CFC-14 ou CF_4) dans l'air sont les seuls flux retenus puisqu'ils sont responsables de plus de 98% de l'effet de serre des systèmes évalués dans une modélisation d'impact sans considération temporelle. Il faut noter que ces flux sont considérés, peu importe le sous-compartiment puisque le potentiel de réchauffement climatique n'est pas influencé par ce type de désagrégation.

Simplification pour les flux de processus

Les processus décrivant la production d'énergie sont liés, dans une grande proportion, à des émissions de gaz à effet de serre qui ont lieu dans un court laps de temps avant cette production. Il s'agit majoritairement de gaz émis lors de la combustion des ressources utilisés pour produire de l'énergie à partir de sources conventionnelles. En considérant la précision temporelle nécessaire pour la modélisation des impacts qui est de l'ordre de l'année. Ces processus sont donc appelés dans la période où les flux élémentaires ont lieu.

Il faut aussi reconnaître que la distribution d'électricité et la consommation de cette électricité se font dans des délais beaucoup plus courts que les périodes annuelles et même mensuelles qui sont utilisées. Il est donc possible de regrouper tous les processus qui ne sont pas en lien avec l'infrastructure en utilisant un seul et même flux de processus. Les flux de processus appelés par les consommations définis dans les figures 6.5 et 6.6 peuvent donc se regrouper. Il est, par exemple, possible de regrouper les processus de combustion de charbon dans les centrales des différents pays exportateurs fournissant de l'électricité à la France pour les décrire tous par un flux de processus.

Le regroupement pour le processus de combustion de gaz naturel peut être représenté, sous cette hypothèse, par une distribution temporelle d'une précision annuelle puisqu'il ne varie que très peu sur cette période. Tel que mentionné précédemment, le processus de production d'électricité en France varie de manière importante en fonction du mois de l'année. Il a donc fallu, pour ces systèmes, définir des processus pour chacun des mois de production et créer 12 distributions temporelles mensuelles pour modéliser la consommation d'énergie électrique sur le cycle de vie des différents scénarios. Ces distributions temporelles représentant des flux de processus sont présentées à l'annexe 11. Cette simplification n'est toutefois pas suffisante pour regrouper tous les processus au niveau temporel et il est donc nécessaire de *dynamiser* seulement un certain pourcentage des processus des différents systèmes.

La *dynamisation* d'une proportion des processus du système a pris environ 70 heures pour traiter tous les scénarios. Les deux proportions de dynamisation retenues sont de 85% et 90% soit la caractérisation temporelle de plus de 200 processus. L'option de visualisation des systèmes de la version PhD de Simapro v.7.2.4 a été utile pour faire ce traitement.

Voici le protocole suivi dans Simapro PhD pour faire cette division :

1. Modélisation d'un système en fonction de la méthode GIEC 2007 v.1.02 ;
2. Obtenir la liste en ordre décroissant des processus en lien avec cet impact ;
3. Définir une valeur de troncature pour que la ligne processus restants soit équivalente à 5% ou 10% du total de l'impact ;
4. Reprendre cette troncature pour la modélisation du réseau ;
5. Identifier les pourcentages des flux élémentaires qui peuvent être liés à l'année d'appel des processus ;
6. Comptabiliser ces pourcentages dans la portion dynamisée ;
7. Additionner les portions non dynamisées et la quantité définie par la ligne des processus restant pour déterminer la quantité non dynamisée lors de la modélisation du système.

Pour résumer, toutes les émissions provenant des infrastructures n'ont pas été caractérisées au niveau temporel puisqu'elles ne pouvaient pas être liées à l'année d'appel des processus. Les flux élémentaires de gaz à effet de serre liés à l'énergie utilisée afin de produire les composantes nécessaires à la construction des installations ST ont été considérés comme ayant eu lieu dans l'année de fabrication de l'installation.

Les portions non dynamisées sont ensuite comptabilisées en quantité de CO_2 éq. puisqu'il n'est pas possible d'identifier le type de flux élémentaire négligé. Ces quantités sont ensuite, soit négligées, soit comptabilisées dans la première année des scénarios pour surestimer leur impact dans la période temporelle choisie pour la modélisation dynamique de l'impact.

Analyse du processus de caractérisation temporelle dans ce cas d'étude

Voici quelques commentaires sur la pertinence du mode de caractérisation temporelle retenue dans le chapitre 4 lors de son utilisation dans ce cas d'étude.

Choix d'une précision optimale

Ce cas d'étude démontre bien que la précision temporelle à retenir pour la description des flux élémentaires est celle fixée par la méthode de modélisation des impacts choisie. Dans ce cas, la méthode de modélisation dynamique de Levasseur *et al*. (2010) a arbitrairement été définie avec une précision annuelle et c'est pourquoi tous les flux élémentaires ont été modélisés avec ce niveau de précision.

Le choix optimal de précision pour la caractérisation temporelle des flux de processus reste toutefois un sujet qu'il n'est pas possible de traiter pleinement dans cet exemple. Les choix d'une précision annuelle et mensuelle permettent d'en apprendre plus sur l'importance de l'effet de ces choix sur des résultats d'étude, mais la question de la variabilité n'est que survolée. Cette question reste pourtant primordiale pour évaluer le niveau de précision optimale pour une caractérisation temporelle des flux de processus dans différents systèmes.

Temps de travail

L'étape de caractérisation temporelle lors de la modélisation du système décrite dans cette section est laborieuse. Plusieurs simplifications sont nécessaires. Malgré les nombreuses simplifications, la quantité de travail nécessaire au traitement spécifique de la caractérisation temporelle est équivalente à deux semaines de travail à temps plein.

Plus de 200 processus ont dû être analysés, au moins en partie, pour déterminer la proportion de flux élémentaires de gaz à effet de serre qui pouvaient être liés à l'année d'appel de leurs processus respectifs. La caractérisation temporelle d'une précision mensuelle a multiplié par 12 le nombre de processus à modéliser pour la description de la production d'électricité. La quantité de données à analyser augmente le risque d'inattentions expliquant de nouvelles erreurs de modélisation. Ce cas d'étude, qui reste assez simple à cause des hypothèses de simplification, semble confirmer les inquiétudes de certains spécialistes du domaine. C'est-à-dire qu'il est non envisageable de faire des études ACV qui considèrent les spécificités temporelles à moins que ces mêmes spécificités soient renseignées dans des BDDs. En effet, la caractérisation temporelle d'un système complexe requiert une nouvelle charge de travail qui semble très couteuse et garante d'erreurs.

Liste des scénarios en fonction des catégories

Les spécificités temporelles des scénarios et systèmes décrits dans cette sous-section et la précédente imposent l'évaluation environnementale d'un grand nombre de scénarios pour ce cas d'étude. En tout, 24 calculs doivent être effectués pour traiter toutes les spécificités décrites dans les sous-sections précédentes. Le tableau 6-3 présente une liste de 24 scénarios liés à ces 24 calculs différents.

Tableau 6-3 : Liste des différents systèmes à modéliser pour considérer les différentes spécificités définies lors de la description générale du cas d'étude et de la modélisation des systèmes

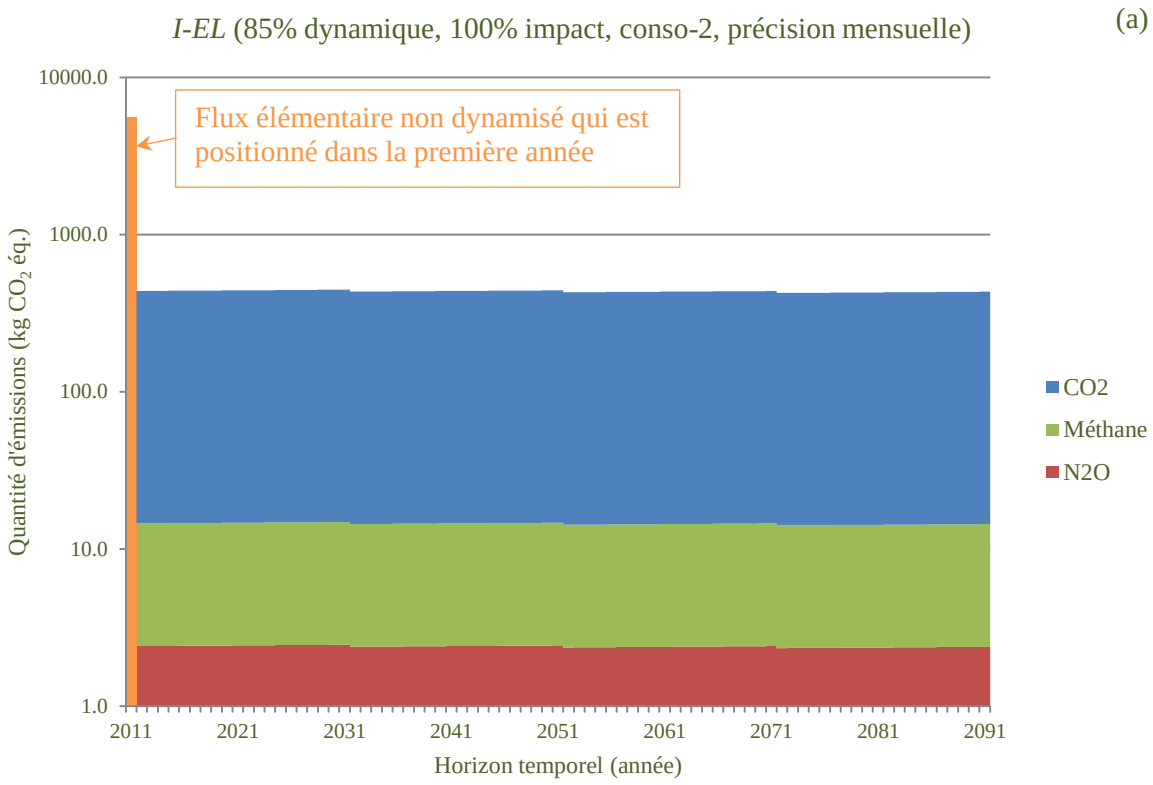
Liste des systèmes considérés
Catégorie *I-GN*
Modélisation traditionnelle
90% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-1
90% dynamique / 90% des impacts / précision annuelle / conso-1
85% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-1
85% dynamique / 85% des impacts / précision annuelle / conso-1
85% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-2
Catégorie *I-EL*
Modélisation traditionnelle
85% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-1
85% dynamique / 85% des impacts / précision annuelle / conso-1
85% dynamique / 100% des impacts / précision mensuelle / conso-1
85% dynamique / 85% des impacts / précision mensuelle / conso-1
85% dynamique / 100% des impacts / précision mensuelle / conso-2
Catégorie *I-ST+GN*
Modélisation traditionnelle
90% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-1
90% dynamique / 90% des impacts / précision annuelle / conso-1
85% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-1
85% dynamique / 85% des impacts / précision annuelle / conso-1
85% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-2
Catégorie *I-ST+EL*
Modélisation traditionnelle
85% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-1
85% dynamique / 85% des impacts / précision annuelle / conso-1
85% dynamique / 100% des impacts / précision mensuelle / conso-1
85% dynamique / 85% des impacts / précision mensuelle / conso-1
85% dynamique / 100% des impacts / précision mensuelle / conso-2

Plusieurs spécificités expliquent la nécessité des 24 calculs présentés dans le tableau 6-3. Il faut considérer :

- Les types d'installations (4 catégories différentes)
- Le niveau de dynamisation
    - 3 pour les installations utilisant du gaz (0%, 85% et 90%)
    - 2 pour les installations utilisant de l'électricité (0% et 85%)
- La considération de différents pourcentages du total de l'impact modélisé
- Différent niveau de discrétisation temporelle des distributions représentant la consommation
- Deux profils de consommation de l'ECS (figure 6.4)

6.3.3 Calcul de l'ICV à partir de la méthode ESPA+

Une description détaillée du calcul d'ICV équivalente à celle présentée dans la sous-section 6.2.3 n'offre pas de nouvelles informations pour ce cas d'étude. Il n'est donc pas jugé pertinent de présenter ce niveau de détail à nouveau. Il faut toutefois noter que le calcul des ICVs caractérisés au niveau temporel s'est fait avec le logiciel Excel et qu'il ne s'agit pas d'un outil qui permet l'utilisation directe d'information provenant des BDDs. Ce n'est pas non plus une solution judicieuse pour utiliser des opérateurs comme le produit de convolution. La figure 6.7 présente deux ICVs caractérisés au niveau temporel. Il s'agit des ICVs liés au système *I-EL* (précision mensuelle, 85% dynamique, 100% impact) et au système *I+ST-GN* (précision annuelle, 85% dynamique, 100% impact) qui ont été calculés avec la méthode ESPA. La section orange présente la partie non dynamisée des flux élémentaires qui est rapportée à la première année du cycle de vie considérée.



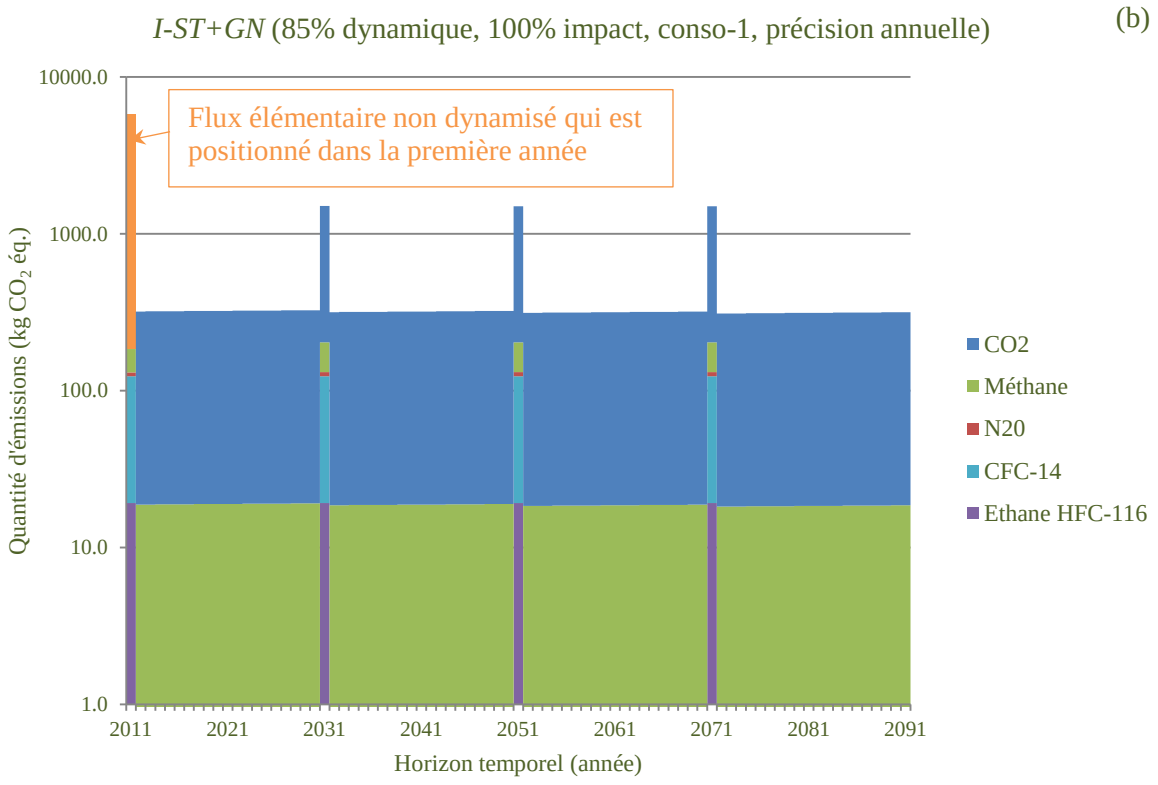


Figure 6.7 : Distributions temporelles représentant les ICVs caractérisés au niveau temporel pour les systèmes :
(a) *I-EL* (85% dynamique, 100% impact, conso-2, précision mensuelle)
(b) *I+ST-GN* (85% dynamique, 100% impact, conso-1, précision annuelle).
La section orange représente la proportion des flux élémentaires non dynamisés dans le calcul

6.3.4 Modélisation dynamique du réchauffement climatique

L'outil de modélisation des impacts environnementaux rendu disponible par Levasseur et al (2010) permet d'obtenir plusieurs indicateurs de réchauffement climatique en fonction du temps par rapport à différents horizons temporels. La figure 6.8 présente l'impact radiatif des émissions pour les années modélisées en fonction des résultats d'ICVs caractérisés au niveau temporel de la figure 6.7. La figure 6.9 présente, quant à elle, l'impact cumulatif relatif à l'émission d'un kg de CO_2 dans l'air à l'an 0, et ce, en fonction des mêmes résultats d'ICVs caractérisés au niveau temporel.

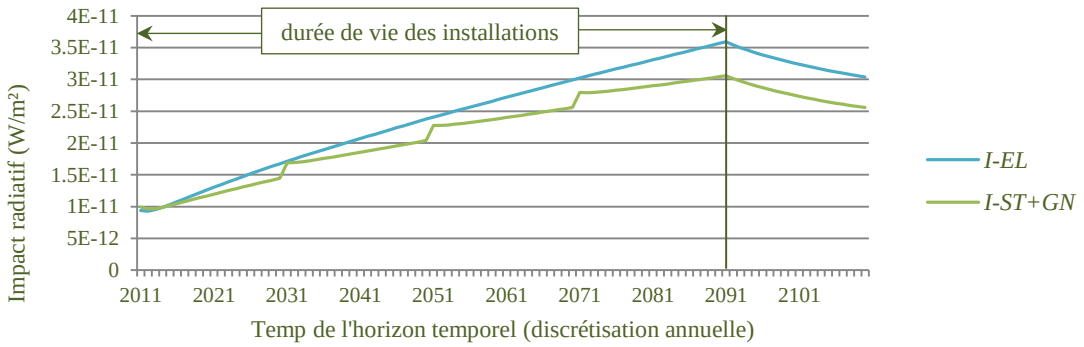


Figure 6.8 : Impact radiatif de deux scénarios pour chaque année sur l'horizon temporel fixé de 100 ans

La distribution temporelle décrivant l'impact radiatif du système *I-ST+GN* sur les différentes années permet clairement d'identifier l'effet du renouvellement de l'infrastructure de l'installation tous les 20 ans pendant les 80 années du cycle de vie. L'arrêt d'un apport de nouveaux flux élémentaires provenant de ces systèmes après 80 ans est aussi facilement identifiable dans la figure 6.8. L'impact radiatif du système *I-ST+GN* devient plus faible que celui du système *I-EL* après 5 ans et reste plus faible sur la totalité de l'horizon temporel de 100 ans malgré un rapprochement lors du premier renouvellement d'infrastructure à l'année 2031.

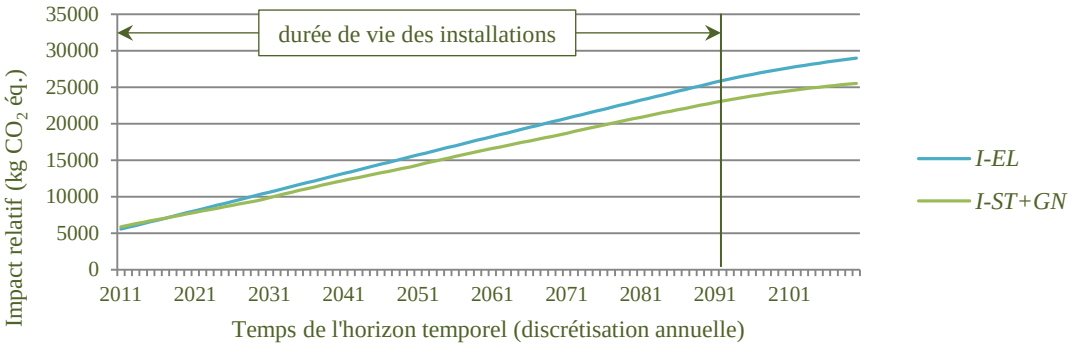


Figure 6.9 : Impact cumulatif de deux scénarios relatif à l'émission de 1 kg de CO_2 à l'année 0 en fonction de l'horizon temporel fixé de 100 ans

La distribution temporelle décrivant l'impact cumulatif relatif du système *I-ST+GN* dissimule, quant à elle, les renouvellements des infrastructures pour ce scénario. L'arrêt d'un apport de nouveaux flux élémentaires pour ces systèmes après 80 ans n'est plus clairement identifiable dans la figure 6.9. L'impact cumulatif relatif du système *I-ST+GN* devient plus faible que celui du système *I-EL* après 9 ans et reste plus faible sur la totalité de l'horizon temporel de 100 ans. Les informations des deux types de résultats sont donc différentes même si une analyse sur 80 ans suggère une meilleure performance environnementale pour le système *I-ST+GN* modélisé ici.

Les résultats d'une modélisation du réchauffement climatique cumulatif relatif sur l'horizon temporel de 100 ans pour tous les systèmes considérés dans ce cas d'étude sont présentés dans le tableau 6-4. Cette comparaison pour un même horizon temporel (100 ans) permet l'analyse de plusieurs tendances, dont la comparaison avec les résultats d'une modélisation des impacts traditionnels[i]. L'analyse de ces tendances est présentée à la sous-section 6.3.5 (page suivante).

[i] Qui ne considère pas les spécificités temporelles des flux élémentaires

Tableau 6-4 : Résultats de l'impact cumulatif relatif à l'horizon de 100 ans pour le potentiel de réchauffement climatique de différents scénarios avec et sans considération des spécificités temporelles

Scénario	Résultats Tonnes de CO_2 éq.	Différence par rapport au traditionnel
Catégorie *I-GN*		
Modélisation traditionnelle	73,6	0%
90% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-1	53,2	-28%
90% dynamique / 90% des impacts / précision annuelle / conso-1	45,9	-38%
85% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-1	53,6	-27%
85% dynamique / 85% des impacts / précision annuelle / conso-1	42,8	-42%
85% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-2	53,6	-27%
Catégories *I-EL*		
Modélisation traditionnelle	34,0	0%
85% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-1	24,5	-28%
85% dynamique / 85% des impacts / précision annuelle / conso-1	19,3	-43%
85% dynamique / 100% des impacts / précision mensuelle / conso-1	25,1	-26%
85% dynamique / 85% des impacts / précision mensuelle / conso-1	20,0	-41%
85% dynamique / 100% des impacts / précision mensuelle / conso-2	29,0	-15%
Catégories *I-ST+GN*		
Modélisation traditionnelle	36,3	0%
90% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-1	25,4	-30%
90% dynamique / 90% des impacts / précision annuelle / conso-1	22,4	-38%
85% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-1	25,5	-30%
85% dynamique / 85% des impacts / précision annuelle / conso-1	20,9	-42%
85% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-2	25,5	-30%
Catégorie *I-ST+EL*		
Modélisation traditionnelle	18,3	0%
85% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-1	12,3	-33%
85% dynamique / 85% des impacts / précision annuelle / conso-1	10,3	-44%
85% dynamique / 100% des impacts / précision mensuelle / conso-1	14,5	-21%
85% dynamique / 85% des impacts / précision mensuelle / conso-1	12,3	-33%
85% dynamique / 100% des impacts / précision mensuelle / conso-2	19,5	+7%

Premier constat :

La modélisation dynamique des impacts environnementaux génère des résultats quasi systématiquement plus faibles que la modélisation traditionnelle. Cette tendance s'explique puisque la modélisation dynamique permet de considérer que l'impact de certaines émissions de GES sur une durée plus courte que la totalité de l'horizon temporel considéré ce qui n'était pas le cas avec la modélisation traditionnelle des impacts environnementaux. Avec la modélisation dynamique du réchauffement climatique, plus l'émission est retardée/décalée par rapport à l'horizon temporel considéré, moins cette émission aura d'effets sur la valeur du réchauffement climatique global. En d'autres mots, la modélisation dynamique permet de modéliser des horizons temporels plus courts pour une certaine proportion des flux élémentaires du cycle de vie d'un système.

6.3.5 Analyse des résultats de modélisation d'impacts environnementaux

Trois tendances sont soulignées dans cette analyse des résultats d'impact cumulatif relatif sur le potentiel de réchauffement climatique des scénarios. La première tendance concerne les distinctions qu'il est maintenant possible d'observer entre des scénarios qui étaient considérés comme équivalent avant de prendre en compte la caractérisation temporelle. La deuxième tendance concerne l'importance de la précision lors de la caractérisation temporelle pour l'étape de modélisation des systèmes. La troisième tendance concerne la variabilité du niveau d'impact cumulatif relatif en fonction du degré de dynamisation des flux élémentaires calculés pour définir un ICV.

Distinction entre des scénarios traditionnellement équivalents

La modélisation traditionnelle des scénarios des catégories *I-EL* et *I-ST+GN* ont déjà été effectué dans l'étude ESTHACE I (Adra *et al.* 2009). Ces deux scénarios ont été évalués comme équivalent dans cette étude au niveau de leur empreinte carbone. La discussion de ces résultats relevait toutefois l'importance de la source d'énergie utilisée. Une considération de la variabilité temporelle de la production d'électricité française était donc une piste intéressante à suivre pour voir si les deux scénarios peuvent être départagés. L'utilisation de la méthode de calcul ESPA et de la méthode de modélisation dynamique de Levasseur *et al* (2010) a permis cette considération. Les résultats sont présentés dans la figure 6.10.

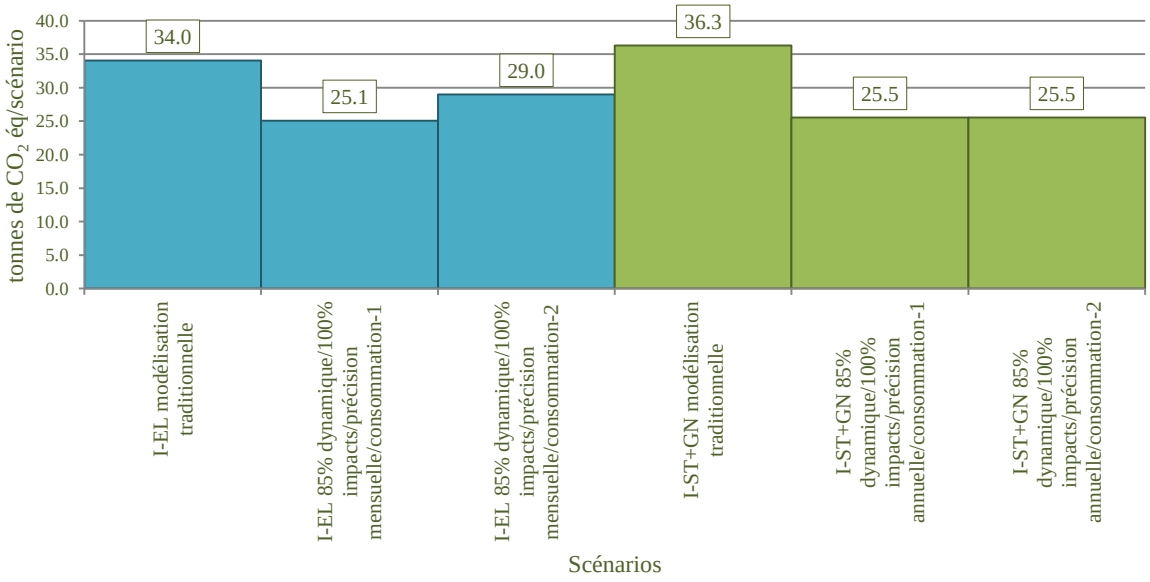


Figure 6.10 : Résultats de l'impact cumulatif relatif à l'horizon temporel de 100 ans pour les catégories de scénarios I-EL et I-ST+GN. Les résultats considérant et ne considérant pas les spécificités temporelles des émissions sont comparées dans cette figure

La différence dans les résultats s'explique par une combinaison (1) de l'effet de la modélisation dynamique des impacts (2) et de la spécificité temporelle de la modélisation des systèmes portant sur le profil de consommation durant une année standard (consommation homogène sur l'année ou consommation uniquement hivernale).

Les résultats de la figure 6.10 indiquent que la considération des spécificités temporelles permet d'identifier une inversion de tendance entre ces deux types de systèmes seulement pour un cas extrême de consommation d'ECS pendant les mois les plus froids de l'année (voir la figure 6.4 pour la description de la consommation 2). En effet, le système solaire thermique avec appoint au gaz qui est lié à des émissions de GES plus importantes pour presque tous les scénarios devient plus intéressant que les émissions de GES d'une installation 100% électrique avec une consommation extrêmement

variable dans l'année. Il est même possible d'observer une diminution de la différence dans les tendances lorsque la consommation d'ECS varie moins (consommation 1) entre les différents mois d'une année. Cette diminution de la différence démontre l'incertitude dans la comparaison des résultats lorsque la variabilité temporelle des systèmes n'est pas considérée. L'inversion de tendance observée indique ensuite qu'il est pertinent de considérer les spécificités temporelles des flux de processus lors de la modélisation des systèmes.

Les valeurs du tableau 6-4 permettent de différencier l'effet de la modélisation dynamique des impacts de celle des systèmes sur les résultats finaux de chaque catégorie. Les catégories *I-GN* et *I-EL* permettent de bien identifier l'effet de la modélisation dynamique des impacts en comparant les résultats traditionnels avec ceux d'une modélisation dynamique de 85% (précision annuelle et conso-1). En effet, les systèmes modélisés ne varient pas entre les différents scénarios traditionnels et ceux décrit par une modélisation annuelle. Pour ces deux catégories, la modélisation dynamique des impacts amène une diminution respective de 27% et 28% par rapport à la modélisation traditionnelle. Une comparaison équivalente pour les catégories *I-ST+GN* et *I-ST+EL* démontre des variations respectivement plus importante de 30% et 33%. Il faut toutefois considérer qu'une proportion de cette différence provient du positionnement temporel des installations ST à quatre moments différents du cycle de vie des scénarios.

Les systèmes des catégories *I-EL* et *I-ST+EL* deviennent très différents lors d'une modélisation dynamique de ceux-ci avec une précision mensuelle. La comparaison des résultats de précision annuelle et mensuelle pour ces catégories permet donc d'identifier l'importance de la modélisation dynamique des systèmes dans ces cas spécifiques. L'effet d'une modélisation dynamique des systèmes de catégorie *I-EL* amène donc une variation allant de 2% à 13% par rapport à la modélisation non-dynamique de ces systèmes. L'effet d'une modélisation dynamique des systèmes de catégories *I-ST+EL* amène, quant à elle, une variation allant de 12% à 40%.

La comparaison des variations des résultats de différents scénarios en fonction des effets de la modélisation dynamique des impacts ou de la modélisation dynamique des systèmes démontre que la plus grande source de variation dépend des systèmes et scénarios. Il n'est donc pas possible de prioriser un type de modélisation dynamique (impacts ou système) puisque leur importance peut varier selon les études ACV accomplies.

Tendance en fonction de la précision de la caractérisation temporelle

Quatre valeurs du tableau 6-4 sont identiques deux par deux. Ces valeurs décrivent l'impact cumulatif relatif à l'horizon temporel de 100 ans pour le potentiel de réchauffement climatique des scénarios suivants :

- 85% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-1
- 85% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-2
- 85% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-1
- 85% dynamique / 100% des impacts / précision annuelle / conso-2

La distinction entre ces scénarios se situe sur la distribution de consommation d'ECS pendant une année standard. Il est toutefois normal que les résultats soient équivalents pour chaque catégorie de scénarios puisque la caractérisation temporelle est faite avec une précision annuelle lors de la modélisation des systèmes représentant ces scénarios. Il n'est donc pas possible d'observer l'effet des variations mensuelles dans les résultats. Il s'agit d'un premier exemple de perte d'information lié à une modélisation peu précise des systèmes au niveau de la caractérisation temporelle.

Il est pertinent de présenter les résultats de l'impact cumulatif relatif pour les scénarios qui propose les deux niveaux de précision temporelle pour compléter cette discussion. La figure 6.11 présente donc les résultats pour les catégories *I-EL* et *I-ST+EL* avec l'utilisation de précision annuelle ou mensuelle lors de la modélisation des systèmes.

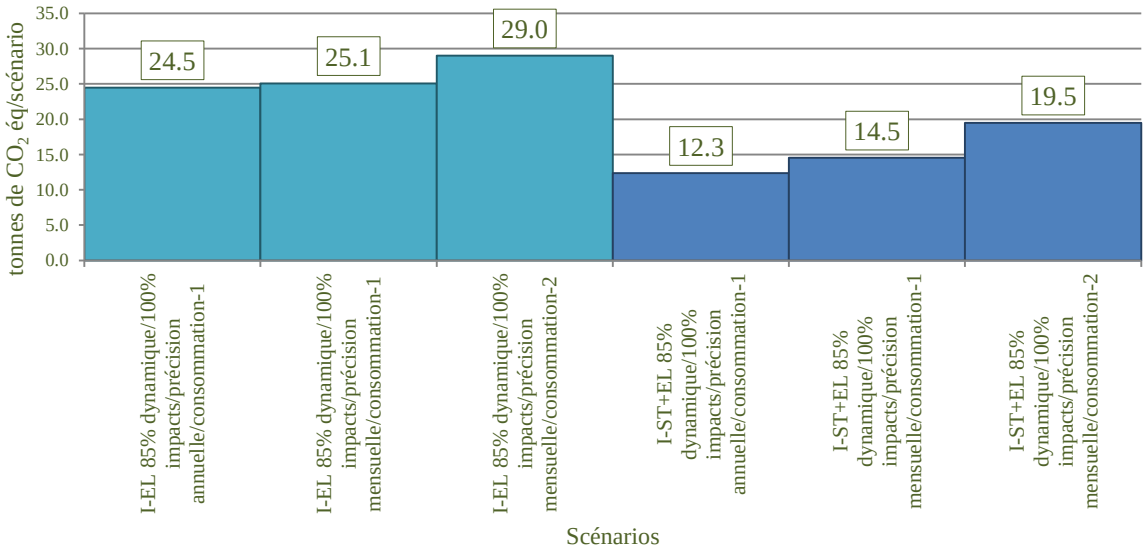


Figure 6.11 : Résultats de la modélisation dynamique des impacts cumulatifs relatifs pour des scénarios des catégories *I-EL* et *I-ST+EL* considérant des précisions temporelles annuelles ou mensuelles lors de la modélisation des systèmes.

Les résultats présentés à la figure 6.11 démontrent bien la variation potentielle des impacts de différents scénarios en fonction d'une considération plus précise de la variabilité temporelle lors de la modélisation de certains systèmes. L'importance de cette considération est encore plus visible dans la catégorie de scénarios *I-ST+EL* puisque ce type de scénario subit les effets d'une variation mensuelle du mix électrique français et de la variation mensuelle de l'irradiation solaire reçue par l'installation. Comme pour les résultats de la figure 6.10, la différence des résultats est plus marquée lorsque le profil de consommation d'ECS varie de manière importante pendant les différents mois d'une année.

Variation en fonction du degré de dynamisation du système modélisé

Plusieurs spécialistes du domaine de l'ACV ont indiqué leurs inquiétudes face au temps requis pour la caractérisation temporelle lors de la modélisation dans différentes études ACV (Collet et al. 2011; Finnveden et al. 2009; Heijungs and Suh 2002; Reap et al. 2008). Le travail de caractérisation temporelle accompli dans cette section corrobore ces inquiétudes.

Pour remédier à cette difficulté, Collet *et al*. (2011)ont proposé une méthode pour dynamiser seulement une partie des systèmes en fonction de l'importance de la variabilité temporelle des FCs et des quantités de flux élémentaires liés à ces FCs. Il est alors pertinent d'évaluer la variation des résultats d'une modélisation des impacts environnementaux en fonction de différents pourcentages de dynamisation des flux élémentaires constituant un ICV. Cette évaluation devrait, en effet, permettre d'identifier un niveau optimal de dynamisation, au moins pour la méthode de modélisation dynamique choisie, si la tendance est non linéaire.

La figure 6.12 présente les résultats d'impact cumulatif relatif des catégories *I-GN* et *I-ST+GN* puisque ce sont les seules catégories où trois niveaux de dynamisation ont été considérés. Deux valeurs (niveaux) étant insuffisantes pour détecter des tendances non linéaires.

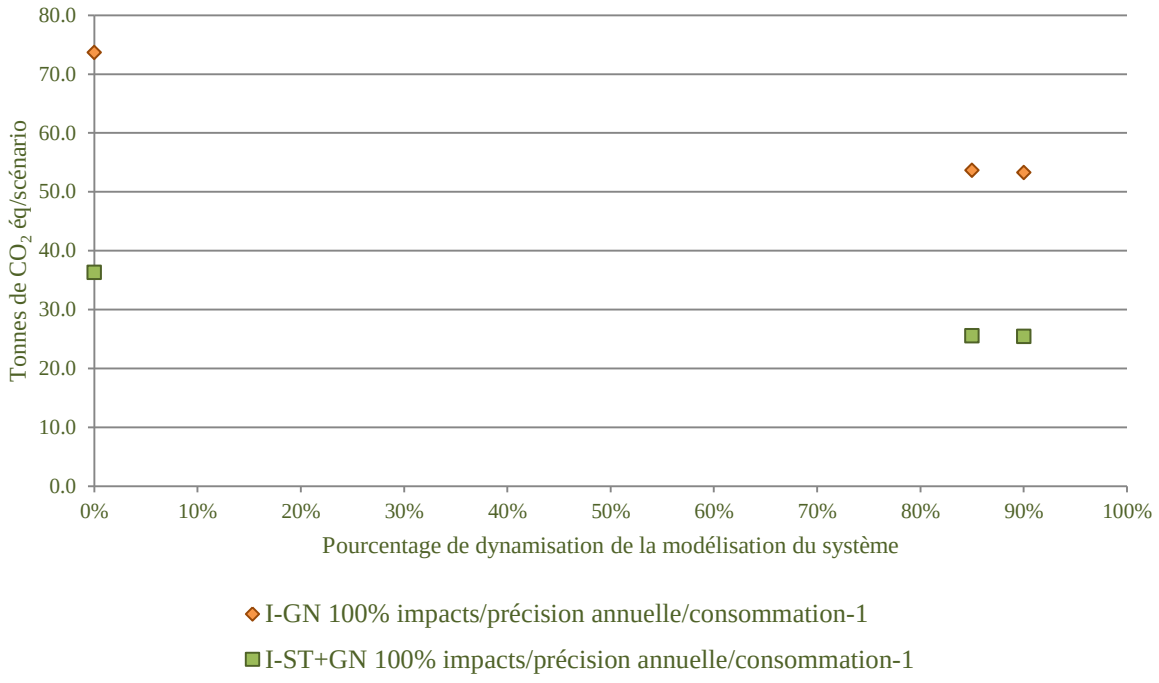


Figure 6.12 : Résultats de la modélisation d'impact cumulatif relatif des catégories *I-GN* et *I-ST+GN* en fonction du pourcentage de dynamisation des flux élémentaires calculés. Le niveau 0% est en fait le résultat d'une modélisation ACV traditionnelle sans considération des spécificités temporelles des flux élémentaires de l'ICV.

Les résultats de la figure 6.12 semblent indiquer une tendance non linéaire en fonction du pourcentage de dynamisation des flux élémentaires d'une ICV. Toutefois, les deux modélisations dynamiques sont trop rapprochées pour identifier une tendance claire. Il serait donc pertinent, dans le futur de faire de nouveaux calculs d'ICVs avec des niveaux de dynamisation plus espacés.

6.4 Résumé du chapitre

Ce chapitre présente la mise en œuvre du mode de caractérisation spatiotemporelle (voir chapitre 4) et de la méthode de calcul ESPA (voir chapitre 5) pour deux cas d'études qui portent sur le domaine de l'énergie renouvelable.

Le premier cas d'étude décrit le détail de la mise en œuvre des développements proposés dans les chapitres 4 et 5 pour un système simplifié qui représente la fabrication d'une installation photovoltaïque. Le travail entourant la caractérisation spatiotemporelle y est analysé. L'utilisation de caractéristiques spatiales de différentes précisions confirme le respect d'une des conditions du cadre d'évaluation des modes de caractérisation spatiotemporelle. Cet exemple démontre, par une application simple, qu'il est possible de faire le calcul d'un ICV caractérisé au niveau spatiotemporel. La présentation des résultats de l'ICV caractérisé au niveau spatiotemporel décrit comment le format des résultats peut simplifier la phase d'analyse de la méthode ACV. Enfin, les hypothèses sur la durée de vie des composantes de l'installation photovoltaïque prennent, dans cet exemple, une plus grande importance puisqu'elles définissent le moment d'appel de ces composantes. Il faudra donc porter une attention particulière à la précision et variabilité des durées de processus pour les études qui considèrent les spécificités temporelles. Il faut aussi noter qu'une évaluation de la période de représentativité temporelle des processus est une information essentielle dont il faut disposer dans les BDDs

Le deuxième cas d'étude présente la modélisation de différents scénarios représentant différentes installations de production d'eau chaude sanitaire en considérant les spécificités temporelles. Des installations conventionnelles (gaz naturel et électricité) sont comparées aux nouvelles installations solaires thermiques. Ces comparaisons sont faites en tenant compte de consommations d'énergie variables dans le temps, de modifications d'efficacité énergétique dans le temps, de niveaux de précision temporelle annuelle ou mensuelle et de proportions différentes de dynamisation des ICVs. Tous les systèmes modélisés sont définis à partir de la BDD ecoinvent et considèrent plus de 2000 processus. Plusieurs hypothèses simplificatrices sont d'ailleurs nécessaires pour faire la caractérisation temporelle des systèmes ayant un tel niveau de complexité. Malgré ces simplifications, le temps de travail nécessaire à la caractérisation temporelle des systèmes de ce cas d'étude confirme qu'une désagrégation temporelle demande des efforts non négligeables par rapport à la charge de travail déjà attendu pour réaliser une étude ACV. Une caractérisation temporelle relative prend donc tout son sens puisqu'elle réduit cette quantité de travail. Ce cas d'études ne s'arrête cependant pas au calcul de l'ICV caractérisé au niveau temporel et établit le lien avec la méthode de modélisation dynamique du potentiel de réchauffement climatique qui a été proposée par Levasseur et al (2010). L'évaluation environnementale de ces scénarios de production d'ECS permet de tirer plusieurs conclusions sur la considération des spécificités temporelles dans une étude ACV. En résumé, il faut souligner que la précision de la caractérisation des flux élémentaires dépend des besoins de la méthode de modélisation dynamique utilisée. La précision temporelle de la caractérisation des flux de processus est un sujet plus compliqué à cerner puisqu'il dépend de la variabilité dans le temps des processus à considérer. Il faut tout de même souligner qu'une plus grande précision dans la caractérisation temporelle des flux de consommation d'électricité a permis de détecter des inversions de tendances dans la comparaison de scénarios. Finalement, une première évaluation de l'effet d'une dynamisation partielle des ICVs a été présentée pour alimenter de futures discussions. L'évaluation de la tendance des impacts modélisés en fonction du niveau de dynamisation des ICVs est intéressante puisqu'une tendance confirmée pour différents systèmes permettrait, à terme, de simplifier le processus de considération temporelle lors de la phase de modélisation des impacts environnementaux.

7 CONCLUSION

La nécessité de considérer les spécificités spatiotemporelles pour évaluer et comparer des performances environnementales et la faible quantité d'études ACV considérant ces spécificités ont été le point de départ des réflexions de cette thèse. L'analyse de la méthode ACV et de l'historique de son développement a permis d'identifier plusieurs lacunes.

- La pertinence des modes de caractérisation spatiale et temporelle existants n'est pas évaluée ;
- Le protocole pour établir la correspondance entre les ICVs caractérisés au niveau spatiotemporelle et les méthodes de modélisation des impacts environnementaux n'est pas encore explicitement établi ;
- Le vocabulaire sur les aspects temporels n'est pas encore standardisé ;
- La caractérisation temporelle des BDDs est quasi inexistante ;
- La description des flux élémentaires par des distributions temporelles n'est pas possible même si celui-ci est un format pertinent pour la modélisation des impacts environnementaux.

Au delà de ces lacunes, il semblait important d'identifier le frein majeur de mise en œuvre pour la considération des spécificités spatiotemporelles au sein de différentes études ACV. La recherche de ce frein a interpellé ma réflexion tout au long de mes travaux. J'ai ainsi donc identifié que la caractérisation spatiotemporelle imposait une perte de la généricité dans la définition des processus contenus dans les BDDs. Cette perte de généricité amène ensuite une perte d'utilité des BDDs puisqu'il n'est plus possible de réutiliser les informations pour différentes études. Selon une autre perspective, la perte de généricité des processus impose la définition d'une très grande quantité de processus pour décrire les multiples scénarios possibles qui peuvent décrire des systèmes de l'activité humaine. Donc, la perte de généricité constitue le frein majeur à toute initiative pour la considération des spécificités spatiotemporelles dans les études ACV. La question de la généricité des processus des BDDs est donc devenue un concept clé et a ainsi guidé l'orientation de mes travaux.

En considérant ce concept clé, des propositions de développements méthodologiques sur la caractérisation spatiotemporelle des systèmes et sur la méthode de calcul des ICVs ont été présentées pour combler les lacunes spécifiques identifiées. Ces développements méthodologiques ciblent essentiellement la mise en œuvre de la considération des spécificités spatiotemporelles dans différentes études ACV. L'avantage majeur de ces développements est d'offrir une solution pour caractériser les BDDs au niveau spatiotemporel tout en conservant une portion importante de la généricité des processus de BDDs.

Les développements méthodologiques proposés pour la méthode ACV sont jugés comme une étape critique pour améliorer la représentativité et la précision lors de l'évaluation de la durabilité environnementale de différents systèmes. Ces développements ont finalement été testés sur des systèmes de production d'énergie à partir de sources renouvelables puisque les spécificités spatiotemporelles de ces systèmes sont importantes pour la modélisation représentative de leurs impacts environnementaux. En effet, ces systèmes et leurs effets sur l'environnement peuvent varier de manière importante dans le temps et en fonction des sites de production. C'est donc ce type de système qui peut nous en apprendre beaucoup sur les spécificités liées à la considération des caractéristiques spatiotemporelles des systèmes.

7.1 Développements méthodologiques

Deux développements méthodologiques sont proposés dans cette thèse. Il s'agit de la proposition d'un mode de caractérisation spatiotemporelle et de la modification de la méthode de calcul standard des ICVs pour permettre la mise en œuvre de la caractérisation spatiotemporelle dans différentes études ACV.

7.1.1 Proposition d'un mode de caractérisation spatiotemporelle

La proposition d'un mode de caractérisation spatiotemporelle a été possible à partir de l'analyse de la pertinence des modes de caractérisation spatiale et temporelle existants. Il n'existe toutefois pas de cadre d'évaluation de la pertinence des modes de caractérisation et encore moins de discussion sur ce qui rend un mode de caractérisation spatiotemporel pertinent. La première étape pour proposer un mode de caractérisation spatiotemporelle a donc été de définir un cadre d'évaluation de la pertinence des modes.

Définition du cadre d'évaluation de la pertinence des modes de caractérisation

En se basant sur les principes généraux de la méthode ACV et les publications sur la considération des spécificités spatiales et temporelles dans les études ACV, il est possible de définir un cadre d'évaluation de la pertinence des modes de caractérisation spatiotemporelle pour les sources d'informations (BDDs) utilisées dans différentes études ACV. Le cadre d'évaluation de la pertinence des modes de caractérisation retenu repose sur la définition de 2 critères et 3 conditions :

Critère :

1. *Le temps de travail pour caractériser les systèmes décrits dans les BDDs*
2. *Le potentiel de précision de la caractérisation*

Conditions :

1. *Assurer que la caractérisation est utile à la modélisation des impacts environnementaux*
2. *Permettre une gestion de précision variable en fonction des itérations des études*
3. *Garantir la propagation de la caractérisation à travers les différentes étapes de calcul*

Il est important de préciser que la définition de ce cadre d'évaluation de la pertinence requiert un jugement de valeur. Ce cadre d'évaluation de la pertinence favorise, en effet, la représentativité de la modélisation des systèmes plutôt que la transparence. La priorité de la représentativité est explicitement identifiable dans l'analyse de la pertinence des modes de caractérisation existants.

La proposition de ce cadre et l'analyse des cadres existants ont permis d'en arriver à la définition d'un mode de caractérisation spatiotemporelle plus pertinent.

Mode de caractérisation spatiotemporelle retenu

Le mode de caractérisation spatiotemporelle retenu se définit par des formats d'information et l'établissement de liens avec certains flux décrivant les systèmes modélisés dans les études ACV.

La caractérisation spatiale se fait sous un format géographique (définition de régions) et est directement lié aux flux élémentaires des différents processus constituants le système. Une caractérisation spatiale des processus peut être offerte, mais seulement à tire indicatif et ne sera pas utilisée pour la caractérisation de l'ICV.

La caractérisation temporelle se fait avec un format de distributions temporelles relatives au processus. Ce type de description est valide aussi bien pour une majorité des flux de processus que pour les flux élémentaires. C'est, en fait, le caractère relatif de la définition de ces distributions temporelles qui va permettre de conserver un certain niveau de généricité pour les informations des BDDs.

7.1.2 Modification de la méthode de calcul standard des ICVs

La méthode *ESPA+* de calcul d'ICV est développée afin de permettre la propagation de la caractérisation spatiotemporelle des systèmes vers les ICVs. Il s'agit ici d'une caractérisation spatiotemporelle basée sur les spécificités du mode de caractérisation spatiotemporelle retenu.

Cette nouvelle méthode *ESPA+* repose sur le développement en série de la création des inventaires. Il est obligatoire en effet d'utiliser ce développement en série puisque le produit de convolution requiert une relation linéaire entre les termes de l'équation. Cette série doit s'arrêter à un certain niveau et il n'est donc pas possible de dynamiser la totalité des flux élémentaires constituant les ICVs. Il y aura donc toujours des flux restants dont il faudra modéliser les impacts environnementaux à partir de FCs temporellement standards. Il faut donc minimiser cette proportion de flux élémentaires dynamisés pour optimiser la représentativité temporelle de la modélisation du système.

Finalement, il faut souligner qu'un ICV caractérisé au niveau spatiotemporel présente des informations utiles pour la phase d'analyse des études ACV ce qui peut représenter un avantage non négligeable.

7.2 Mise en œuvre des développements méthodologiques

L'application des développements méthodologiques proposés pour deux cas d'études permet de confirmer leur intérêt et offre aussi de nouvelles observations pertinentes sur leurs avantages et limites. Les cas d'études choisis concernent des systèmes de production d'énergie à partir de sources renouvelables puisque ces systèmes sont sujets à de grandes variabilités spatiotemporelles.

7.2.1 Confirmation de conclusions précédentes

- Le mode de caractérisation spatiotemporelle retenu et la méthode ESPA+ de calcul d'ICV permettent d'obtenir des ICVs caractérisés au niveau spatiotemporel pour différents scénarios;
- Le temps de travail pour la caractérisation spatiotemporelle des systèmes d'une étude ACV est important (plus de 70 heures de travail) s'il n'est pas disponible dans une BDD. Il est donc utile voir indispensable que les BDDs offrent ce type d'information;
- La caractérisation spatiotemporelle selon le mode retenu n'affecte pas la méthode de modélisation des systèmes et scénarios dans différentes études ACV;
- Les nouvelles caractéristiques spatiotemporelles de l'ICV sont utiles à l'analyse des résultats;
- Une caractérisation spatiotemporelle est pertinente pour obtenir une modélisation des impacts environnementaux plus précise et représentative;
- La précision de la caractérisation temporelle des flux élémentaires doit dépendre du besoin de précision des méthodes de modélisation des impacts environnementaux.

7.2.2 Nouvelles conclusions

- La caractérisation temporelle des systèmes impose l'identification de nouvelles incertitudes liées à la nécessité de faire des hypothèses sur les moments d'appel de processus ou de flux élémentaires;
- La précision de la caractérisation temporelle des flux de processus ne doit pas nécessairement être équivalente à celle des flux élémentaires pour obtenir une modélisation représentative;
- Une caractérisation temporelle plus précise des flux de processus peut être source de différence avec les résultats d'une modélisation ACV traditionnelle;
- Une caractérisation temporelle peut permettre de discriminer d'avantage des scénarios qui sont évalués comme équivalents selon une modélisation ACV traditionnelle;
- Il est important d'identifier la variabilité temporelle des processus pour définir le niveau de précision utile dans la description des flux de processus d'un système;
- La modélisation dynamique des impacts varie potentiellement de manière non linéaire en fonction du niveau de dynamisation des ICVs

Il serait intéressant que la plupart de ces conclusions soient validées par différentes études qui pourraient concerner des systèmes n'appartenant pas au secteur de la production d'énergie afin de s'assurer de la généralisation de celles-ci.

7.3 Conclusion générale

L'analyse des moyens actuels de considération des spécificités spatiotemporelles et la proposition de développements méthodologiques permettent l'identification des freins actuels à la mise en œuvre de cette considération dans les études ACV.

Le premier frein se situe dans la quantité d'information caractérisée au niveau spatiotemporel qui est disponible dans les sources d'information utilisée (BDD). Régler ce problème ne requiert pas de développements méthodologiques, mais un grand effort de recherche d'informations. Il semble donc pertinent d'être stratégique dans la collecte de données.

La proposition d'un mode de caractérisation spatiotemporelle pour les sources d'information utilisées pour la modélisation des systèmes est une des clés permettant d'établir une stratégie de collecte de données plus efficace. En effet, il devient plus simple d'identifier le type et la précision d'information qu'il faut obtenir pour faire des modélisations ACV plus représentatives.

Le nouveau mode de caractérisation spatiotemporelle proposé et la méthode ESPA+ sont des solutions au frein de mise en œuvre majeur que constitue la perte de généricité lié à la discrétisation spatiotemporelle. Cette solution est partielle puisqu'elle résout seulement la perte de généricité provenant de la caractérisation temporelle. Il n'est donc pas possible de résoudre le problème de la perte de généricité des processus liés à la caractérisation spatiale. Le problème reste entier au niveau spatial puisqu'il n'est pas possible de procéder à une caractérisation spatiale relative des flux décrivant les systèmes. En effet, il n'est pas possible de définir que la production d'aluminium, nécessaire à la fabrication d'éolienne en France, a lieu en Russie sauf en définissant un système spécifique dans une BDD.

Ceci étant dit, les développements méthodologiques proposés dans cette thèse permettent finalement d'obtenir des ICVs caractérisés au niveau spatiotemporel et ce type d'ICVs ouvre la porte à des études ACV plus représentatives au niveau de la modélisation des systèmes et des impacts environnementaux.

Des ICVs caractérisés au niveau spatiotemporel permettront aussi potentiellement d'offrir des informations supplémentaires pour les décideurs dans le secteur de la production d'énergie. En effet, l'identification des sites et moments d'extraction de ressources énergétiques peut être accomplie à partir de ce type d'ICV et cette information est toujours importante pour évaluer les stratégies de développements de la production dans différents pays. Il sera même possible de définir des profils d'impacts environnementaux dans le futur à partir de ce type d'ICV. Pour résumer, l'ajout de ces développements méthodologiques offre de nouvelles capacités à la méthode ACV qui contribuent à améliorer la pertinence de l'évaluation de la durabilité environnementale des systèmes du secteur de la production d'énergie.

7.4 Perspectives de recherche

Le travail de propositions, d'analyse et de mise en œuvre de développements méthodologiques pour la considération des spécificités spatiotemporelles dans les études ACV a permis d'identifier plusieurs pistes de recherche. Toutes les pistes concernent des aspects méthodologiques qu'il faudra probablement considérer pour améliorer la représentativité et simplifier le travail de modélisation ACV. Cinq sujets sont identifiés. Il s'agit de la récolte de données, de l'identification des paramètres nécessaires à une modélisation des impacts environnementaux, de la division des informations nécessaire à la modélisation, de l'interopérabilité et des concepts d'incertitudes et de variabilité.

7.4.1 Incertitude et variabilité

Une des conclusions de la mise en œuvre des développements méthodologiques proposés dans cette thèse est que la caractérisation temporelle impose l'analyse de nouvelles sources d'incertitude dans la modélisation. Ces nouvelles sources d'incertitudes doivent être identifiées, analysées et décrites pour faciliter leur identification dans les études ACV. Il faudra faire le même type de discussion sur les nouvelles sources de variabilité spatiotemporelle des flux modélisés.

7.4.2 Collecte de données

Tel que mentionné précédemment dans la conclusion générale, la collecte de données reste un grand défi pour améliorer la représentativité de la modélisation des systèmes pour différentes études ACV. Il faudra assez rapidement faire une évaluation de la précision nécessaire pour décrire les systèmes de manière suffisamment représentative. Le niveau de précision sera probablement toujours fonction des besoins de l'étude ACV mais une analyse de la variabilité spatiotemporelle des processus devrait permettre de fixer une taille de région et une période réduisant suffisamment la variabilité de la description de ces processus. La variabilité spatiotemporelle des impacts environnementaux devra aussi jouer un rôle dans l'évaluation de la précision de la caractérisation nécessaire des flux élémentaires. Cette analyse nécessite probablement de grands efforts, mais il est possible que certaines tendances soient observées pour différents domaines et l'identification de ces tendances permettrait de développer des stratégies pour la construction des BDDs.

L'évaluation du niveau de précision utile pour la caractérisation spatiotemporelle peut aussi être critique pour planifier la gestion des BDDs. La nécessité d'une très grande précision, donc d'une très grande perte de généricité risque d'imposer la gestion d'une quantité de données très importantes (évaluation quantitative difficile pour le moment). La description de l'activité humaine nécessitera alors la définition d'une multitude de processus et la taille des matrices $\mathbf{E}$ et $\mathbf{T}$ pourrait, dans le futur, être un élément dont il faudra se soucier. Cette grande taille peut impliquer des temps de calcul de plus en plus importants quand on décrit des systèmes avec plus de détail ou que l'on considère des systèmes plus complexes. Aujourd'hui le niveau de complexité de description de l'activité humaine ne cause pas vraiment de problèmes puisque notre connaissance est relativement réduite et le calcul est donc rapidement effectué avec des ordinateurs personnels. Le développement des connaissances du système qu'est l'activité humaine pourrait cependant devenir problématique. Il faudra potentiellement envisager que la modélisation ACV nécessite des puissances de calcul proches de celle du domaine de la prévision météorologique.

7.4.3 Paramètres nécessaires à la modélisation des impacts environnementaux

Les développements méthodologiques proposés dans cette thèse tentent de répondre à l'intérêt soulevé par de nombreuses publications, au moins pour certains systèmes et certaines catégories d'impacts, de considérer les spécificités spatiotemporelles pour une modélisation ACV représentative. Il me semble important d'identifier toute autre caractéristique de l'activité humaine qui puisse avoir une influence sur la modélisation des impacts. Il sera alors possible de prévoir une intégration stratégique de cette information dans les BDDs. Les conclusions de cette thèse démontrent en effet qu'une intégration non planifiée de certaines informations peut laisser place à des difficultés de mise en œuvre qui pourraient prendre plusieurs décennies à régler. Il sera aussi intéressant de connaître ces caractéristiques rapidement pour identifier si celles-ci peuvent être définies de manière relative comme pour la caractérisation temporelle. L'effet sur la généricité des processus des BDDs face à l'intégration d'information qui peut être relativisée sera alors bénéfique.

7.4.4 Gestion des informations décrivant le système analysé

La discussion précédente fait référence aux caractéristiques décrivant l'activité humaine qui peuvent être utile à la modélisation des impacts environnementaux. La spécification activité humaine n'est pas fortuite. Récemment, une des propositions des principes de Shonan (Sonnemann *et al*. 2011) a souligné l'intérêt d'ajouter des informations décrivant l'environnement pour la situation géographique des processus définis dans une BDD. Cette proposition semble inutile puisque ce type d'information est potentiellement disponible dans d'autres sources d'informations qui décrivent l'environnement. L'accomplissement d'études ACV requiert déjà la gestion d'une grande quantité d'information et il me semble pertinent de ne pas dédoubler les sources. Je considère qu'il serait plus judicieux de séparer explicitement les secteurs de modélisation dans le domaine de l'ACV afin d'identifier les sources d'informations qui soient pertinentes à chaque spécialité. Il faudrait, dans ce cas, séparer les sources d'informations utiles à la modélisation de l'activité humaine de celle utile à la modélisation des impacts environnementaux.

7.4.5 Interopérabilité des sources d'information

La récolte de données sera probablement toujours un aspect contraignant pour la réalisation d'études ACV. Il semble pertinent de chercher à diminuer le temps de travail nécessaire à cette recherche d'informations par tous les moyens possible. Le concept d'interopérabilité est important à introduire à ce stade de la réflexion pour assurer que différentes sources d'information puissent être utilisées lors de la réalisation d'études. Les principes de Shonan présentent ce concept, mais il faudra rapidement identifier les tenants et aboutissants de l'interopérabilité pour favoriser l'échange de données. Le mode de caractérisation spatiale retenu dans les travaux de cette thèse est d'ailleurs choisi partiellement en fonction de sa plus grande interopérabilité que le mode de caractérisation spatiale retenu récemment pour la troisième version d'ecoinvent. Il reste toutefois une grande discussion sur le format d'information qu'il serait pertinent d'utiliser pour assurer un haut niveau d'interopérabilité non seulement avec les autres BDDs mais aussi avec d'autres sources d'information pertinente. L'interopérabilité du format choisi doit aussi, à terme, considérer les formats qui sont retenus pour les sources d'information qui sont nécessaires à la définition des méthodes de modélisation des impacts environnementaux. Il sera alors probablement plus simple d'établir des correspondances entre les ICVs et les facteurs de caractérisation des méthodes de modélisation des impacts environnementaux.

ANNEXE 1 : PRODUCTION D'ENERGIE

Caractéristiques du secteur de la production d'énergie

Le secteur de la production d'énergie est un système vaste et complexe. L'objectif de cette annexe est d'en décrire une partie afin d'identifier certaines considérations pertinentes à sa modélisation. Cette modélisation doit ensuite servir à l'évaluation de la durabilité environnementale. Il est donc utile de restreindre la discussion aux caractéristiques nécessaires à une évaluation environnementale. Les sources et technologies utilisées doivent être considérées lorsqu'il est question de la modélisation environnementale des systèmes de production d'énergie. Ces sujets sont ici détaillés en différents points pour mieux comprendre les tenants et aboutissants de la modélisation de ce type de systèmes.

Production, consommation et utilisation de ressources naturelles

Production

Les statistiques récentes de l'AIE indiquent que le charbon, le pétrole, le gaz et la biomasse (surtout le bois de chauffage) sont les sources d'énergie les plus utilisées au niveau mondial, et ce, depuis plus de 3 décennies.

Ce portrait n'est toutefois pas représentatif de la variabilité de la production dans différents pays. Plusieurs pays possèdent des tendances différentes de production d'énergie qui font partie du spectre des mix de production à travers le monde. La variabilité de l'utilisation des différentes sources d'énergie utilisées pour la production de différents pays indique clairement qu'il existe une variabilité non négligeable de production entre les pays. Les statistiques d'autres pays disponibles sur le site web de l'AIE (IEA 2011) confirment cette disparité de production à travers le spectre mondial. Ces statistiques décrivent aussi un changement des proportions de sources utilisées depuis 1971. Ces statistiques indiquent donc que le secteur de la production d'énergie est aussi sujet à une variabilité temporelle.

Consommation

Comme pour les statistiques de production, les valeurs de consommation démontrent aussi qu'il existe une disparité régionale et temporelle dans la consommation d'énergie. Il faut noter que la consommation d'énergie de différents pays ne correspond pas à la production[i] à cause de l'importation et l'exportation de ressources énergétiques et il est important de considérer ces différences.

La comparaison des valeurs de la production et des valeurs de la consommation permet d'identifier que plusieurs pays ne sont pas en autarcie énergétique. En effet, les valeurs totales et proportions de sources utilisées ne sont pas équivalentes à celles de la production. Le Canada, l'Allemagne et la Norvège sont des exemples de pays exportateurs. La France, quant à elle, est un exemple de pays importateur.

Il existe donc une interdépendance entre les pays au niveau énergétique et ce lien devient important puisqu'il indique implicitement que la durabilité environnementale du secteur de l'énergie d'un pays ne dépend pas seulement de décisions étatiques. La gestion stratégique de la production et consommation d'énergie au niveau régionale doit donc considérer la situation internationale ou à tout le moins celle des pays exportateurs ou ceux bénéficiant des exportations.

[i] La comparaison considère la différence entre une énergie produite et une énergie primaire utilisée. Il est cependant difficile d'arriver à faire un calcul précis des valeurs d'énergie équivalent puisque les performances de transformation des sources d'énergie ne sont pas disponibles pour l'énergie primaire utilisée dans chaque pays.

Enjeux de la variabilité spatiotemporelle de la production et de la consommation

Les statistiques présentées par l'AIE démontrent qu'il existe une variabilité spatiotemporelle au niveau des quantités d'énergie produite et consommée dans différents pays. Il est important de comprendre comment les changements dans le secteur de l'énergie peuvent affecter la durabilité environnementale de l'activité humaine afin de valider l'importance de la considération de cette variabilité. Voici un exemple de l'importance de cette variabilité

Exemple a1-1 : Effet de la variabilité de consommation énergétique sur le pilier environnemental

D'un point de vue environnemental, il semble intéressant d'utiliser les sources qui possèdent le moins d'impact. Les habitants de régions où l'on retrouve de grandes quantités de ressources renouvelables pourraient donc s'intéresser à augmenter la proportion de leur exploitation afin d'offrir un service plus durable au niveau environnemental. La proportion d'énergie hydroélectrique de la Norvège est un exemple d'un haut niveau d'utilisation de ressources renouvelables. Il faut cependant évaluer les risques sur la biodiversité qui peuvent être causés par l'exploitation d'une grande proportion des cours d'eau d'une région. En d'autres mots, la concentration géographique (donc une variabilité géographique de l'exploitation) des sources peut poser des risques sur la durabilité des écosystèmes pour différentes espèces indigènes.

L'exemple a1-1 démontre qu'une concentration de la production d'énergie peut avoir des effets, même indirects, sur la durabilité environnementale du secteur. La qualité de l'air dans une région abritant une grande quantité de centrales utilisant du charbon comme carburant est un exemple d'effet plus direct de la production d'énergie sur la durabilité de l'environnement. Il est toutefois difficile de donner une liste complète des raisons pour se soucier de la distribution spatiotemporelle des installations de production d'énergie et il est surtout pertinent de faire l'identification du degré de variabilité du secteur lors de l'évaluation de sa durabilité environnementale. Une information sur le degré de variabilité à différentes échelles pourra ensuite être analysée par des experts et décideurs afin de porter des choix éclairer sur les modifications à apporter pour rendre le système global de production à un niveau de durabilité environnementale supérieur.

Utilisation des ressources naturelles

L'importance de la consommation d'énergie non renouvelable décrite dans les statistiques de l'AIE et l'exemple a1-1 souligne le besoin de connaître les stocks d'énergie disponibles dans différentes régions du monde. La définition de l'information reliée à ce besoin est abordée selon trois axes. Premièrement, l'évaluation du total des ressources naturelles énergétiques définit les limites et la variabilité spatiotemporelle au sein du secteur de l'énergie contemporaine. Deuxièmement, une analyse de l'importance des flux de ressources actuels permet une meilleure compréhension des liens entre différentes structures de l'activité humaine. Finalement, une discussion par rapport aux deux premiers axes guide une réflexion face à la durabilité environnementale de la structure en lien avec les limites connues. La discussion globale cherche à décrire l'historique de la gestion des stocks et leurs répartitions actuelles.

Réserves reconnues

Les statistiques utilisées dans cette sous-section proviennent de « British Petroleum » (BP 2012) et du « World Energy Council » (Council 2011). BP est une des grandes compagnies pétrolières qui proposent des statistiques annuelles sur les stocks reconnus de différentes ressources énergétiques. Le « World Energy Council » propose, quant à lui, un rapport statistique beaucoup plus détaillé qui est mis à jour tous les trois ans. Les données proposées dans ces deux références ne correspondent pas toujours, mais les ordres de grandeur semblent normalement être équivalents. Les données de BP permettent une analyse rapide et visuelle. Le document du « World Energy Council » donne cependant

des valeurs permettant de mieux définir les limites des stocks puisque toutes les ressources (non renouvelables et renouvelables) sont renseignées.

Les statistiques de BP et du World Energy Council présente la répartition sur le globe de différents stocks prouvés de pétrole et gaz naturel pour les années 1990, 2000 et 2010. Il s'agit en fait des ressources exploitables avec une rentabilité économique potentielle. Les proportions présentées pour le pétrole et le gaz naturel, bien que définies avec peu de finesse, démontrent bien qu'il existe une variabilité spatiale et temporelle dans la répartition des ressources énergétiques. Cette variabilité spatiotemporelle existe, non seulement au niveau régional, mais aussi dans la répartition des différentes ressources.

La figure a1.1 présente une analyse plus détaillée du total mondial des stocks prouvés de pétrole pour la période allant de 1980 à 2010 en fonction des différentes régions du monde. Ces valeurs décrivent l'évolution de la disponibilité des ressources dans le temps.

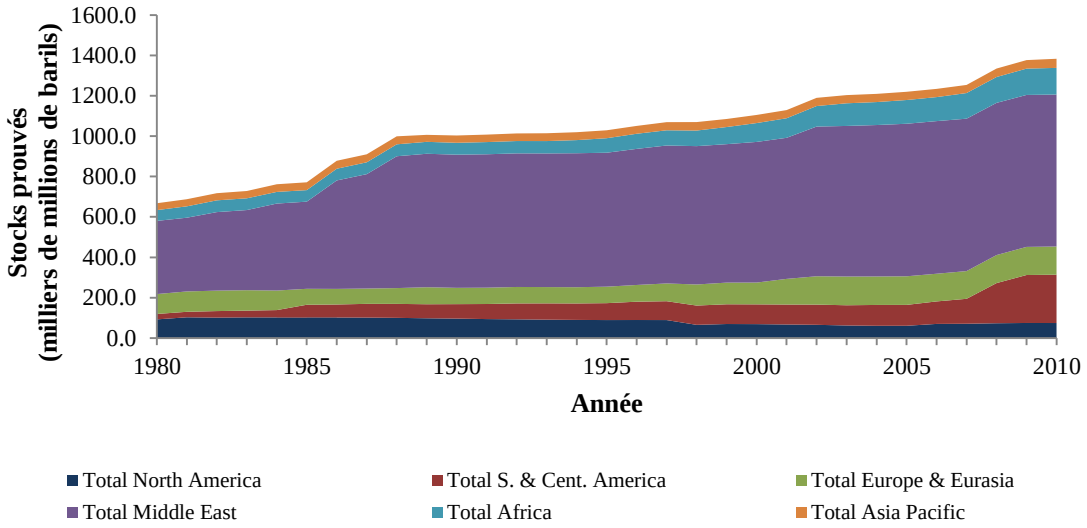


Figure a1.1 : Statistiques de stocks prouvés de pétrole pour la période allant de 1980 à 2010 au niveau mondial (BP 2011). Le total est divisé entre les différentes régions déjà utilisées dans la figure a1.4.

Le tableau a1-7-1 présente l'évaluation du total des réserves de 2008 par le « World Energy Council ». Ces valeurs dressent un portrait d'une partie importante des limites du secteur de la production d'énergie puisqu'il s'agit des limites des ressources qu'il est possible d'exploiter avec la technologie actuelle.

Il est intéressant de comparer les statistiques de réserve du tableau a1-7-1 avec les valeurs de consommation planétaire (total de 350 EJ d'énergie primaire pour l'année 2009 selon l'AIE (IEA 2011)). Un ratio des ressources disponibles par rapport aux taux de consommation donne, en effet, une évaluation grossière du temps restant pour la durabilité de production selon la structure actuelle. Une comparaison plus détaillée du même genre est donc utile pour l'évaluation de la durabilité de la structure de production de différentes régions. Il faut noter que les statistiques de production, de consommation et de réserve sont variables dans le temps et l'espace, et ce, sans qu'elles suivent nécessairement des tendances semblables.

Les statistiques précédentes indiquent clairement qu'il existe une variabilité spatiotemporelle des réserves et flux de ressources énergétiques au niveau mondial. Il ne s'agit cependant pas nécessairement d'un problème pour une gestion durable au niveau environnemental. C'est la limite de ces ressources énergétiques qui est la caractéristique la plus préoccupante, à long terme, pour la durabilité du secteur. Cette question est donc importante dans la gestion d'un développement stratégique du secteur de la production d'énergie et les résultats de ce type d'analyse sont souvent complémentaires à une évaluation environnementale pour offrir une perspective plus globale.

Tableau a1-7-1 : Statistiques mondiales des réserves de différentes ressources énergétiques pour l'année 2008 (Council 2011). Il s'agit ici d'une liste qui est détaillée au niveau étatique dans le document référence.

Type de ressources	Statistiques	Equivalent énergétique
Charbon	860 938 millions de tonnes	25 225 EJ
Pétrole et gaz liquide	1 238 834 millions de barils	7 123 EJ
Gaz de schiste	4 786 131 millions de barils	27 519 EJ
Bitume naturel	243 209 millions de barils	1 416 EJ
Gaz naturel	185 544 milliards de m^3	6680 EJ
Uranium	RAR[i] : 4004 milliers de tonnes IIR 260[ii] : 2301 milliers de tonnes	1682 à 2690 EJ 967 à 1547 EJ
Hydrologique	TEC[iii] : 15 955 TWh/année GTC[iv] : 39 842 TWh/année	57,4 EJ/année 143,3 EJ/année
Biomasse (bagasse – disponibilité 2008)	422 622 milliers de tonnes (à 50% d'humidité)	4,038 à 5,707 EJ
Solaire	Au sol $9{,}3895 \times 10^{17}$ kWh/année	3 380 220 EJ/année
Géothermique	Terre entière : $12{,}6 \times 10^{24}$ MJ Croûte terrestre : $5{,}4 \times 10^{21}$ MJ (seule une fraction peut être exploitée)	12 600 000 000 000 EJ 5 400 000 000 EJ
Eolienne	TLC[v] : 1 000 000 GW (fait partie de la ressource solaire)	??? Inclus dans solaire

[i] RAR : ressources assumées comme raisonnables
[ii] IRR 260 : ressources qui sont inférées à un prix de moins de 260 dollars US le kg
[iii] TEC : capacité d'exploitation avec la technologie actuelle
[iv] GTC : capacité brute théorique
[v] TLC : couverture totale du territoire (il s'agit en fait d'un scénario peu envisageable)

Flux potentiel

La différence entre les valeurs de production et des valeurs de consommation pour différents pays sous-entend un partage des ressources extraites entre différents états. A titre d'exemple, les flux de ressources pétrolières recensés par BP pour l'année 2010 entre différentes grandes régions du globe. Sans ces flux, certains pays ne pourraient répondre à la demande à partir des ressources qu'ils possèdent. L'importation de minerai nucléaire par la France est un exemple clair puisque très peu de matière fissible (~9000 tonnes d'uranium à exploitation très dispendieuse (Council 2011)) est disponible sur son territoire et que sa consommation est l'une des plus importantes au monde. Ces flux varient dans le temps en fonction des changements de stratégies énergétiques des pays ou régions du globe.

La modification des flux dans le temps et entre les régions s'explique de plusieurs façons. Les lois du marché (offre et demande) ne sont pas les seuls aspects qui expliquent ces échanges. Ceci étant dit, les prix des ressources affectent bien leurs échanges. La modification des modes de production dans différentes régions peut aussi expliquer une modification des besoins. La découverte de gisements peut aussi modifier l'intérêt d'une exportation des ressources énergétiques. Il existe donc plusieurs aspects de l'activité humaine qui peuvent avoir un effet sur la variabilité des flux dans le temps et l'espace.

Durabilité environnementale des réserves d'énergie

La limite des réserves énergétiques a surtout un effet indirect sur la durabilité environnementale du secteur. Pour décrire cet effet, il faut surtout considérer les développements technologiques au niveau de la production. Il peut s'agir d'un développement technologique qui permet d'exploiter plus efficacement des réserves de ressources énergétiques. Une plus grande efficacité est, en effet, souvent liée à une diminution des impacts environnementaux par quantité d'énergie produite puisque moins de ressources sont brulées pour obtenir une même production. Il peut aussi s'agir de développements technologiques qui permettent l'exploitation de ressources énergétiques renouvelables. Les technologies photovoltaïques (PV), marée motrice, et celle permettant l'exploitation de l'énergie des vagues en sont des exemples. Ces développements technologiques ont le potentiel d'avoir un effet important sur le pilier environnemental du développement durable. L'exemple de la technologie PV expose clairement cette possibilité. Elle permettra, à terme, de réduire l'utilisation de ressources fossiles qui émettent beaucoup de GES lors de lors combustion. Comme l'énergie solaire est renouvelable, l'utilisation d'électricité produite par des installations PV permettra aussi de réduire la consommation de ressources non renouvelables et donc l'épuisement des réserves énergétiques existantes sur la terre.

ANNEXE 2 : METHODE PERSPECTIVE CYCLE DE VIE

Le tableau a2-1 présente quelques méthodes de modélisation sous perspective du cycle de vie et certaines caractéristiques permettant de les différencier.

Tableau a2-1 : Liste des méthodes de modélisation sous perspective du cycle de vie et leurs particularités

Méthodes	Type d'informations	Caractéristiques spécifiques
EE-I/O	Statistiques économiques	Précision variable en fonction des pays Données disponibles par fréquence de 5 ans Performant dans l'analyse de système macroscopique
ACV	Mesures physiques	Performant dans l'analyse des systèmes de moyenne ou faible complexité Gourmand en information Faible considération des spécificités spatiotemporelles
ACV-hybride	Mesures physiques et statistiques économiques	Mélange des informations entre la méthode EE-I/O et ACV pour considérer une majorité du système
MFA	Mesures physiques	Fais la modélisation d'un seul type de substances sans traduire les résultats en impacts environnementaux

ANNEXE 3 : REFERENCES METHODE ACV

Documents de référence

Plusieurs documents décrivent la méthode ACV. J'ai choisi de présenter 8 documents qui sont particulièrement importants pour comprendre les aspects fondamentaux de cette méthode.

Série de normes ISO 14 040 et 14 044

Les normes ISO 14 040 (ISO 2006b) et 14 044 (ISO 2006a) décrivent la méthode de l'ACV. Ces documents présentent un premier consensus de la communauté de l'ACV sur la structure, les principes et les aspects à considérer pour réaliser une étude ACV. Les normes définissent aussi une liste de termes spécifiques à la méthode ACV. Ces termes sont importants pour une compréhension détaillée des concepts fondamentaux et ils sont donc repris, en partie, pour le glossaire de ce document.

La norme 14 040 est plus générale et définit les principes, la structure de la méthode, les différentes phases, les caractéristiques essentielles et la structure de modélisation de l'activité humaine (systèmes de produits). Cette norme offre aussi une discussion sur le cadre méthodologique, la communication et la revue critique des études ACV.

La norme 14 044 approfondit certains aspects spécifiques du cadre méthodologique, de la communication et de la revue critique. Ce deuxième document est donc un complément du premier qui permet de mieux comprendre certaines particularités de la méthode. Un exemple d'ajout de spécificités est l'explication entourant les critères de coupures permettant de définir les frontières du système modélisé. Cette norme se concentre aussi plus particulièrement sur l'étape de l'évaluation de l'impact du cycle de vie.

Il faut noter qu'aucune des deux normes n'offre de description d'une méthode de calcul permettant d'obtenir l'inventaire du cycle de vie (ICV).

Computational Structure of LCA

L'ouvrage de Heijungs et Suh (2002) se concentre sur les aspects liés aux différents calculs réalisés lors d'une étude ACV. Cet ouvrage comble donc les lacunes des normes ISO 14 040 et 14 044 en ce qui concerne cette discussion. Un standard de nomenclature y est offert pour les termes nécessaires au calcul de l'ICV et pour la modélisation des impacts environnementaux. Les modèles général et détaillé pour l'analyse de l'ICV sont décrits très précisément. Certaines notions complémentaires sont ensuite proposées dans différents chapitres. Il existe d'ailleurs une courte discussion sur la considération des spécificités spatiale et temporelle dans cet ouvrage. Cet ouvrage est donc la référence principale pour détailler la discussion sur les fondamentaux des calculs à entreprendre dans une étude considérant les aspects spatiotemporels.

L'analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie, comprendre et réaliser un écobilan (Jolliet *et al.* 2010) est un des ouvrages qui décrit en détail le contenu d'une ACV contemporaine. Ce livre présente plusieurs facettes de la modélisation ACV tout en respectant la structure proposée par la norme ISO 14 040. Il y a donc une explication détaillée des principes généraux de l'ACV, de la méthode pour définir les objectifs d'une étude et le système modélisé, du calcul de l'inventaire, de l'analyse des impacts environnementaux ainsi que des concepts pertinents à la phase d'interprétation. Plusieurs exemples pertinents permettent de comprendre le niveau de détail et la complexité de la méthode ACV lors de son application. En fait, ce livre permet aux non-initiés de se former pour être compétents dans le domaine de l'ACV.

Le document n'est cependant pas exhaustif sur toutes les questions qui peuvent être soulevées et la structure décrite n'est pas stricte. Il reste donc encore place à l'interprétation lorsque l'on se lance

dans la réalisation d'une ACV. Certains documents cherchent maintenant à restreindre la variabilité des études en cadrant encore plus précisément la méthode ACV.

Manuel ILCD

Il semble que ce soit pour répondre à ce manque de précision que le manuel ILCD (ILCD 2010) a été créé. En effet, ce dernier ouvrage est beaucoup plus exhaustif dans sa description de la méthode ACV. Il décrit des structures spécifiques pour différentes questions auxquelles une étude ACV peut répondre et souligne les étapes à accomplir pour chacune des quatre phases. Il donne aussi une liste permettant de caractériser les études ACV selon leurs objectifs puisque des études ACV avec des objectifs équivalents devraient plus simplement se comparer si les limites de la modélisation sont comparables. Le guide donne aussi des informations sur comment relié les résultats de modélisation ACV à d'autres types d'information environnementale comme les déclarations environnementales de produit (DEP)[i]. Ce dernier document plus récent discute donc plus précisément de la mise en œuvre de la méthode ACV pour différents organismes voulant produire une étude ACV sur différents systèmes.

Consensus des références

Tous ces documents s'accordent sur la structure et les principes généraux de l'ACV et des précisions sur les étapes de la méthode sont données dans les deux derniers documents. Certaines de ces précisions seront reprises dans ce document afin d'expliquer le niveau de considération spatiotemporelle actuelle. Toutefois, seuls les aspects qui concernent les considérations et caractérisations spatiotemporelles en ACV. Autrement dit, tous les concepts importants de la méthode ACV qui ne sont pas concernés par la prise en compte des aspects spatiotemporels ne seront pas discutés dans le bref état de l'art du chapitre 2. Je suggère au lecteur qui veut en savoir plus de consulter le livre de Jolliet et Al (2010) pour approfondir ces connaissances.

Articles récapitulatifs des développements récents pour la méthode ACV et sa mise en œuvre

Trois articles (Finnveden et al. 2009; Guinee et al. 2011; Reap et al. 2008) font des revues des développements récents proposés pour la méthode ACV par les chercheurs du domaine. Ces trois articles discutent de plusieurs sujets, mais plusieurs commentaires sont directement liés aux questions de la considération des spécificités spatiotemporelles lors de la réalisation d'étude ACV.

[i] Le terme anglais plus amplement utilisé est EPD

ANNEXE 4 : CHAMP DE L'ETUDE

Liste des éléments à définir dans l'étape de description du champ de l'étude ACV. Une description détaillée de ces différents éléments est disponible dans les normes ISO 14 040, 14 044, dans l'ouvrage de Jolliet et coll. (2010) et dans le manuel ILCD (2010).

- Le système de produit à étudier
- Les fonctions du ou des systèmes dans le cas d'études comparatives
- L'unité fonctionnelle*
- *La définition du système (*Jolliet *et al, 2010)**
- Les frontières du système*
- Les règles d'affectation (allocation)
- La ou les méthodes d'analyse des impacts et les catégories couvertes
- L'interprétation des résultats à utiliser
- Les exigences sur les données utilisées
- Les hypothèses
- Les choix de valeurs et les éléments facultatifs
- Les limitations
- Les exigences de qualité des données
- Le type de revu critique
- Le type et le format du rapport spécifié pour l'étude
- *Discussion sur la reproductibilité (manuel ILDC)*

* Ces éléments du champ de l'étude nécessitent une discussion sur les spécificités spatiotemporelles lors des modélisations du système et des impacts environnementaux. Ils sont donc détaillés dans la section 2.3 qui décrit la première phase de la méthode ACV.

ANNEXE 5 : LISTE ET DESCRIPTION DE BDDS

Le tableau suivant présente quelques spécificités de 4 bases de données (BDD) fréquemment utilisées pour réaliser des études ACV. Cette liste n'est pas exhaustive, mais permet d'identifier le domaine d'information couvert et comment cette information est gérée dans ces 4 exemples.

Tableau a5-1 : Comparaison des spécificités de 4 BDDs utilisées pour des études ACV

	Base de données			
Spécificités	ecoinvent (v.2 et v.3)	GaBi	ELCD (core database)	USLCI (NREL)
Site Web	http://www.ecoinvent.ch/	http://www.gabi-software.com/index.php?id=209	http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetArea.vm	http://www.nrel.gov/lci/database/
Technologies	agriculture, énergie, transport, biogaz, biomatériaux, produits chimiques, matériaux de construction, matériaux d'emballage, métaux, traitement des métaux, électroniques	automobile, aérospatiale, électronique, produits chimiques, énergie, agriculture, métaux, plastiques, processus de fabrication, transport	Energie, matériaux (plastiques, métaux, bois, etc.), produits chimiques, transport, construction et emballage	Métaux, transport, agriculture, sylviculture, énergie, plastiques, processus de fabrication, matériaux de construction
Quantité de données	Plus de 4,000 fiches de données	Plus de 4500 fiches de données	Quelques centaines de fiches de données	Quelques centaines de fiches de données
Niveau d'agrégation	Faible à moyenne	Moyenne à forte pour une grande proportion des processus	Haut niveau Faible niveau favorisé	Haut niveau Faible niveau favorisé
Format des données	EcoSpold v2	GaBi, ILCD, EcoSpold, xls	ILCD	EcoSpold, xls
Couverture géographie	-ecoinvent 2- Europe avec une concentration sur la Suisse -ecoinvent 3- Internationale avec une Précision régionale	Internationale pour l'énergie Surtout Etats-Unis et Europe pour les autres secteurs	Europe	Etats-Unis
Fiches de données renseignées	ecoinvent 2 : Partielle ecoinvent 3 : Plus détaillée	Partielle	Partielle	Partielle
Temporalité	Création de la fiche de donnée	Création de la fiche de donnée	Création de la fiche de donnée	Création de la fiche de donnée
Fiches de données renseignées	Oui	Oui	Oui	Oui
Age des données	Grande proportion > Année 2000	Mise à jour annuelle	Grande proportion > Année 2000	Grande proportion > Année 2000
Incertitude renseignée	Oui pour plusieurs processus	Pas d'information	???	???

ANNEXE 6 : THEORIE DU CALCUL D'ICV

Démonstration pour l'équation ACV par produit (voir Heijungs et Suh, 2002 ; p.21-22)

En utilisant un vecteur d'échelle ($\vec{s}$), il est possible de définir que :

$$\mathbf{T} \cdot \vec{s} = \vec{r}$$

Si **T** est inversible (donc carré et non singulier), il est ensuite possible de déduire que :

$$(\mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{T})\vec{s} = \mathbf{T}^{-1} \cdot \vec{r}$$

$$\therefore \vec{s} = \mathbf{T}^{-1} \cdot \vec{r}$$

Puisque que $\vec{s}$ est un vecteur d'échelle décrivant les quantités de processus nécessaires à l'accomplissement d'un scénario lié à $\vec{r}$, il est possible d'obtenir l'inventaire $\vec{v}$ à partir de l'équation suivante :

$$\vec{v} = \mathbf{E} \cdot \vec{s}$$

$$\therefore \vec{v} = \mathbf{E} \cdot (\mathbf{T}^{-1} \cdot \vec{r}) = \mathbf{E} \cdot \mathbf{T}^{-1} \cdot \vec{r}$$

Qui définit l'équation permettant d'obtenir un inventaire à partir du premier mode de définition de la matrice **T**. Il s'agit ici d'une définition plus générale de **T**.

Démonstration pour l'équation ACV par processus entrés/sortis

L'utilisation de l'information provenant de la matrice **T** permet de définir la structure d'une chaîne de production ($\vec{s}$) reliée à un scénario défini par le vecteur de référence $\vec{r}$ en utilisant la série suivante :

$$\vec{s} = (\mathbf{I} + \mathbf{T} + \mathbf{T}^2 + \mathbf{T}^3 + \cdots + \mathbf{T}^{\mathrm{n}}) \cdot \vec{r}$$

Où :
I est la matrice identité de dimension équivalente à la matrice **T**
Et n tend vers l'infini.

Il s'agit en fait d'une série de Taylor qui converge vers une formulation équivalente correspondant à :

$$\vec{s} = (\mathbf{I} - \mathbf{T})^{-1} \cdot \vec{r}$$

Il faut ensuite ajouter l'information de la matrice d'échanges environnementaux (**E**) pour obtenir l'inventaire.

$$\vec{v} = \mathbf{E} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{T})^{-1} \cdot \vec{r}$$

ANNEXE 7 : CARACTERISATION SPATIALE DE L'ICV (METHODE DE MUTEL & HELLWEG)

Cet annexe décrit comment obtenir un ICV caractérisé au niveau spatial à partir du mode de caractérisation spatiale des processus 1.0 (Mutel and Hellweg 2009).

ICV caractérisé au niveau spatial avec le mode de caractérisation par processus 1.0

Un ICV caractérisé au niveau spatial peut être obtenu si l'information spatiale, caractérisant les processus, est distribuée sur les différents flux élémentaires définis dans la matrice environnementale $\mathbf{E}$. La désagrégation spatiale de cette matrice permet ensuite d'obtenir une caractérisation spatiale spécifique pour tous les flux élémentaires dans l'ICV. L'équation a7.1 présente la formule standard de calcul des ICV ainsi que la modification de la structure de la matrice environnementale par la description des dimensions des différents vecteurs et matrices.

$$\vec{v} = \mathbf{E} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{T})^{-1} \cdot \vec{r}$$

$$[v]_{m\times k} = [\mathbf{E}]_{m\times k,m} \cdot \left([\mathbf{I}]_{m,m} - [\mathbf{T}]_{m,m}\right)^{-1} \cdot [\vec{r}]_m$$

équation a7.1

Où :

L'indice m est le nombre de régions différentes équivalentes au nombre de processus d'une BDD
L'indice k est le nombre de flux élémentaires dans la modélisation de tous les processus d'une BDD

La définition des indices permet de comprendre que le mode de caractérisation spatiale de processus 1.0 divise aussi les processus en fonction des régions. L'équation a7.2 décrit les vecteurs et matrices nécessaires au calcul d'un ICV sous un autre format que celle de l'équation a7.1 tout en indiquant les dimensions avec le détail de la différentiation spatiale des processus.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_{m\times k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1,1} & \cdots & e_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{m\times k,1} & \cdots & e_{m\times k,m} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & 1 & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} t_{1,1} & \cdots & t_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m,1} & \cdots & t_{m,m} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_m \end{bmatrix}$$

équation a7.2

Il est important de noter ici que le m de la matrice environnementale peut varier en fonction du nombre de régions différentes pour représenter tous les processus d'une BDD. La notation de l'équation a7.2 représente donc une taille maximale si tous les processus sont liés à des régions différentes. La figure a7.2 (voir p. A7-2) décrit de manière schématique comment l'information peut être divisée dans la matrice environnementale ($\mathbf{E}$). Cette représentation sert à mieux comprendre comment la structure de la matrice $\mathbf{E}$ peut définir la caractérisation spatiale des flux élémentaires.

Chaque flux élémentaire (x), pour une région spécifique (y) est lié à une seule ligne de la matrice environnementale ($\mathbf{E}$). Cette division des flux élémentaires caractérisés au niveau spatial est équivalente à celle retrouvée dans l'ICV ($\vec{v}$) caractérisé au niveau spatial.

$$
\mathbf{E} = \left[\begin{array}{c}
\left[\begin{array}{ccccc} e_{1,1} & \cdots & e_{1,n} & \cdots & e_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \iddots & \vdots \\ e_{x,1} & \cdots & e_{x,n} & \cdots & e_{x,m} \\ \vdots & \iddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{k,1} & \cdots & e_{k,n} & \cdots & e_{k,m} \end{array}\right]_1 \\
\vdots \\
\left[\begin{array}{ccccc} e_{1,1} & \cdots & e_{1,n} & \cdots & e_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \iddots & \vdots \\ e_{x,1} & \cdots & e_{x,n} & \cdots & e_{x,m} \\ \vdots & \iddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{k,1} & \cdots & e_{k,n} & \cdots & e_{k,m} \end{array}\right]_y \\
\vdots \\
\left[\begin{array}{ccccc} e_{1,1} & \cdots & e_{1,n} & \cdots & e_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \iddots & \vdots \\ e_{x,1} & \cdots & e_{x,n} & \cdots & e_{x,m} \\ \vdots & \iddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{k,1} & \cdots & e_{k,n} & \cdots & e_{k,m} \end{array}\right]_m
\end{array}\right]
$$

Flux élémentaire 1
Flux élémentaire x
Flux élémentaire k
Région 1
Région y
Région m

Figure a7.2 : Schéma de la structure de l'information dans la matrice environnementale E. Cette structure permet de considérer la variabilité spatiotemporelle des différents flux élémentaires de l'activité humaine. L'activité humaine est en fait ici modélisée à partir des BDD décrivant différents processus.

Il est donc possible de représenter les flux élémentaires d'un ICV en fonction de leur dépendance spatiale sous différent format. La division des régions n'a pas à se combiner pour remplir l'espace spatiale du cycle de vie. Il faut donc considérer que certaines parties du domaine du cycle de vie peuvent être vides et qu'il faudra combiner certaines régions qui se superposent. La question de la superposition mérite une réflexion plus poussée pour s'assurer une compréhension des effets possible des hypothèses de fusion.

Commentaires supplémentaires

Un problème est clairement identifiable à partir de l'équation a7.2. Dans une étude ACV considérant des milliers de processus élémentaires, les paramètres m et k peuvent devenir grand, très rapidement. En effet, le paramètre m doit être très grand pour décrire tous les processus possibles sur le globe si la précision des régions est grande (région à petite dimension). L'analyse de la grandeur de ce nombre sera réservée pour plus tard dans le chapitre. Ceci étant dit, le paramètre m des BDDs contemporaines est déjà supérieur à 4000 pour représenter l'activité humaine sans considération des spécificités spatiales. Il devient alors intéressant, au niveau fonctionnel, de limiter sa croissance lors d'une modélisation. Il serait donc nécessaire de faire une réflexion sur comment limiter le nombre de régions m.

ANNEXE 8 : DISTRIBUTIONS TEMPORELLES

Cette annexe décrit comment il est possible d'utiliser les caractéristiques temporelles du mode de caractérisation temporelle des flux élémentaires 1.0 pour obtenir un ICV décrivant les flux élémentaires par des distributions temporelles.

Calcul de l'ICV

Le calcul d'un ICV caractérisé au niveau temporel reprend, pour ce mode, le format standard de l'équation 2.2. Cependant, la matrice environnementale différencie tous les flux élémentaires qui ont une temporalité distincte. Le calcul de l'ICV peut donc être représenté par la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_{j\times k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1,1} & \cdots & e_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{j\times k,1} & \cdots & e_{j\times k,m} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & 1 & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} t_{1,1} & \cdots & t_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m,1} & \cdots & t_{m,m} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_m \end{bmatrix} \qquad \text{équation a8.1}$$

Où :
j est le nombre de temporalités distinctes nécessaires à la caractérisation temporelle des flux élémentaires du cycle de vie d'un système
k est le nombre de flux élémentaires distincts nécessaires à la modélisation de tous les impacts provenant du système évalué
m est le nombre de processus constituant le système qui est évalué sur son cycle de vie

La valeur du flux élémentaires v_1 de l'ICV est donc obtenue à partir de l'équation suivante :

$$v_1 = \sum_x \sum_y \mathrm{e}_{1,x} \cdot \left(\mathrm{I}_{x,y} - \mathrm{t}_{x,y}\right)^{-1} \cdot \mathrm{r}_y \qquad \text{équation a8.2}$$

Où :
x et y sont des indices de sommation servant à définir le processus responsable du flux élémentaire 1

Il s'agit cependant de la valeur pour une seule temporalité. Il faut donc refaire ce calcul pour les *j* temporalités distinctes et ainsi créer un nouveau vecteur qui désagrège le flux élémentaire entre les différentes distributions le caractérisant. Le vecteur est représenté graphiquement dans la figure a8.1 à la page suivante.

La distribution temporelle agrégeant toutes les distributions temporelles distinctes est présentée à la figure a8.2. Il est important de souligner ici que l'addition des distributions temporelles 1, 2 et 3 est simple puisqu'elles possèdent tousses le même niveau de précision (flux élémentaire mensuel). Deux propositions pour faire l'addition de distributions temporelles à précision variable sont présentées à la sous-section 5.1.2.

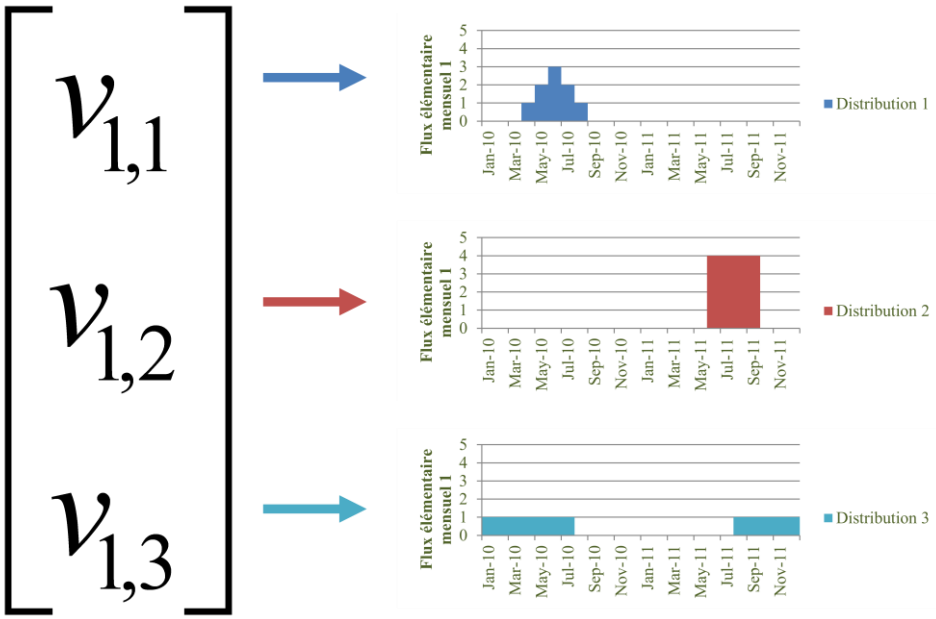


Figure a8.1 : Description graphique d'un vecteur décrivant toutes les distributions temporelles différentes pour un même flux élémentaire d'un ICV. Cet exemple particulier décrit trois distributions différentes.

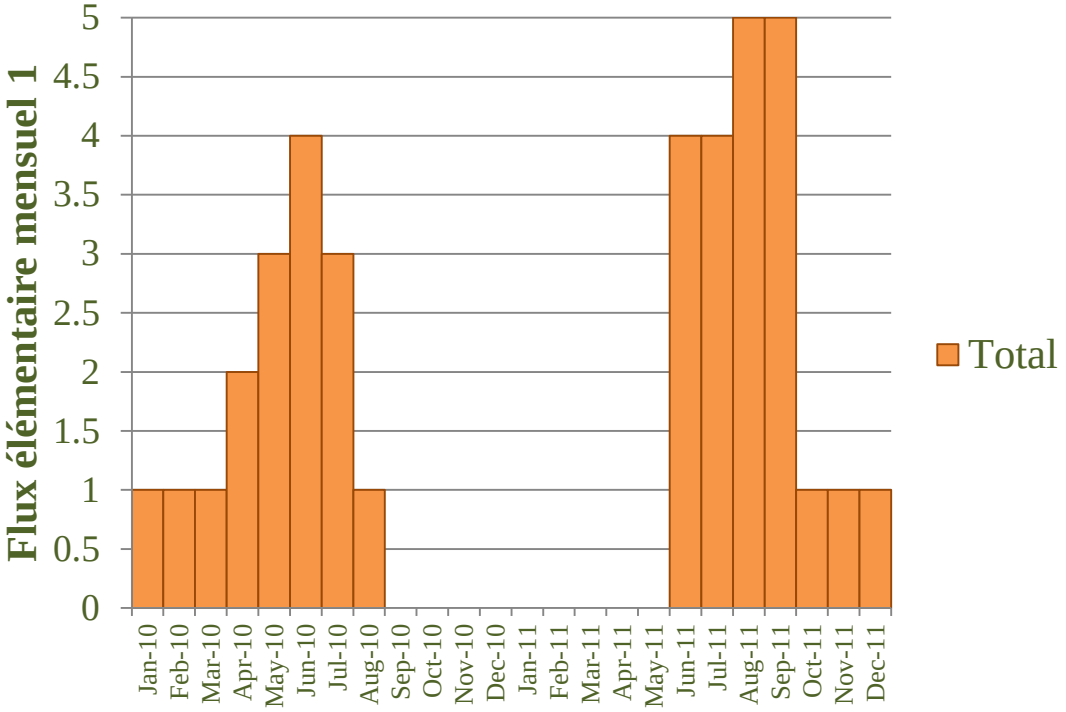


Figure a8.2 : Distribution temporelle globale décrivant le flux élémentaire 1 sur une période de 2 ans. Cette distribution est obtenue en faisant l'addition des flux élémentaires décrits dans la figure a8.1.

ANNEXE 9 : EXEMPLE DE FICHES DE DONNEES

La figure a9.1 de cette annexe présente comment il faut renseigner les caractéristiques spatiales des flux élémentaires dans les fiches de données à partir du format retenu pour le mode de caractérisation spatiale des flux élémentaires 2.0. Le texte en rouge indique le positionnement des caractéristiques spatiales liées aux différents flux élémentaires répertoriés dans une fiche de données.

Exemple d'une fiches de données caractérisée au niveau spatiale

Produit(s) du processus

Nom	Quantité	Unité	Type	Allocation	Catégories	Région	Suppléments
Electricité	1	kWh	Energie	100%	Energie\Elec	France	Mix

Entrées du processus

Extractions dans l'air (compartiment)

Substance	Sous-compartiment	Région	Quantité	Unité	Distribution de l'incertitude	Incertitude	Suppléments
aucune	-	-	-	-	-	-	-

Extractions dans l'eau (compartiment)

Substance	Sous-compartiment	Région	Quantité	Unité	Distribution de l'incertitude	Incertitude	Suppléments
aucune	-	-	-	-	-	-	-

Extractions dans le sol (compartiment)

Substance	Sous-compartiment	Région	Quantité	Unité	Distribution de l'incertitude	Incertitude (écart type)	Suppléments
Charbon	H. Dens. Pop	Pologne	0,54	kg	lognormal	1,5	Moyenne

Appel de processus venant de la sphère technologique

Nom	Quantité	Unité	Type	Distribution de l'incertitude	Inceritude (écart type)	Région	Suppléments
Centrale	2	Qt.	Installation	normal	1,15	Paris	Mix

Sorties du processus

Emissions dans l'air (compartiment)

Substance	Sous-compartiment	Région	Quantité	Unité	Distribution de l'incertitude	Incertitude (écart type)	Suppléments
CO_2	H. Dens. Pop	France	0,15	kg	lognormal	1,5	Moyenne

Emissions dans l'eau (compartiment)

Substance	Sous-compartiment	Région	Quantité	Unité	Distribution de l'incertitude	Incertitude (écart type)	Suppléments
aucune	-	-	-	-	-	-	-

Emissions dans le sol (compartiment)

Substance	Sous-compartiment	Région	Quantité	Unité	Distribution de l'incertitude	Incertitude (écart type)	Suppléments
aucune	-	-	-	-	-	-	-

Produits connexes dans la sphère technologique

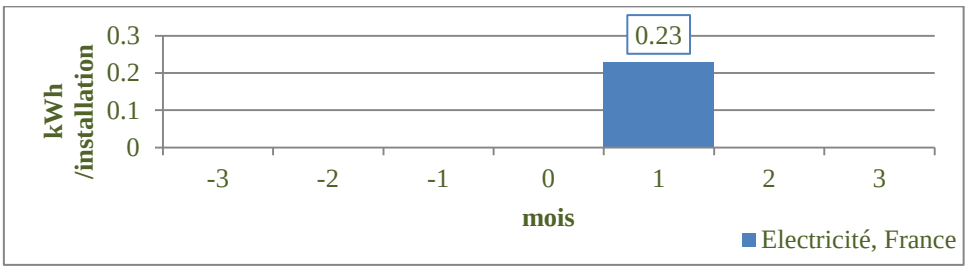
Nom	Quantité	Unité	Type	Distribution de l'incertitude	Inceritude (écart type)	Région	Suppléments
aucune	-	-	-	-	-	-	-

Figure a9.1 : Exemple d'une fiche de données décrivant les émissions la production d'électricité en France avec des centrales au charbon. Les caractéristiques spatiales des flux élémentaires sont soulignées en rouge.

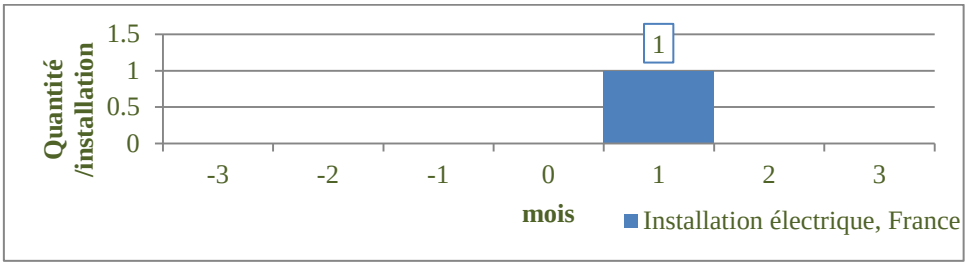
ANNEXE 10 : CAS D'ETUDE #1

Cette annexe présente toutes les distributions temporelles représentant les flux de processus et les flux élémentaires nécessaires à la modélisation du système simplifié représentant une installation photovoltaïque.

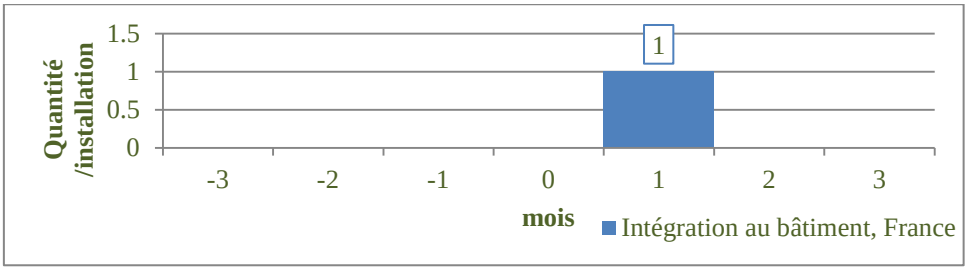
$f_{p1}(t)$



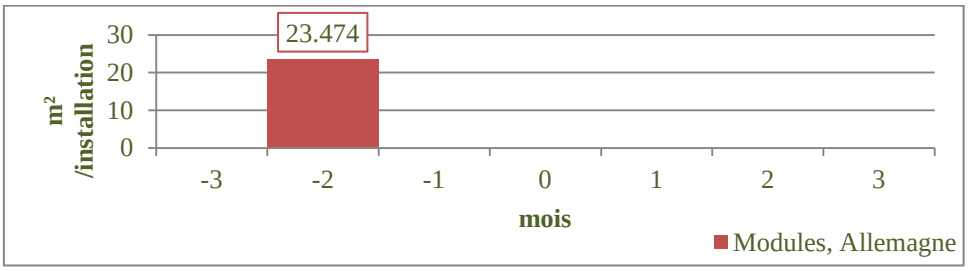
$f_{p3}(t)$



$f_{p4}(t)$



$f_{p5}(t)$



$f_{p6}(t)$

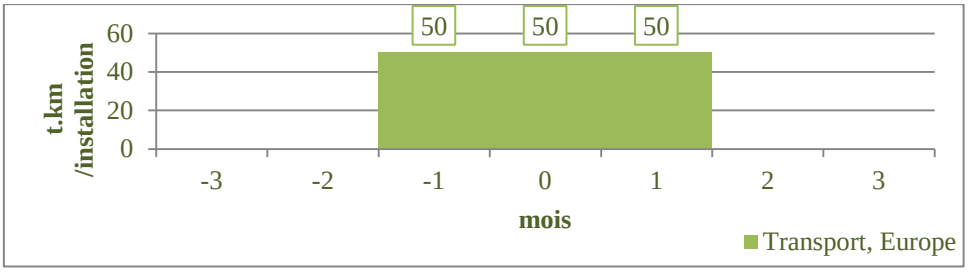
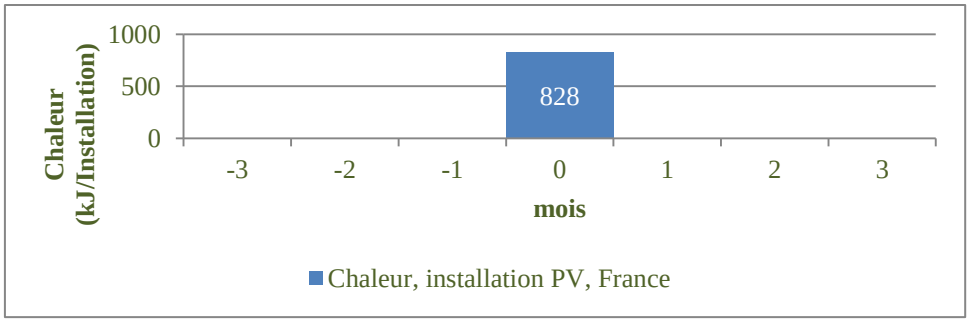
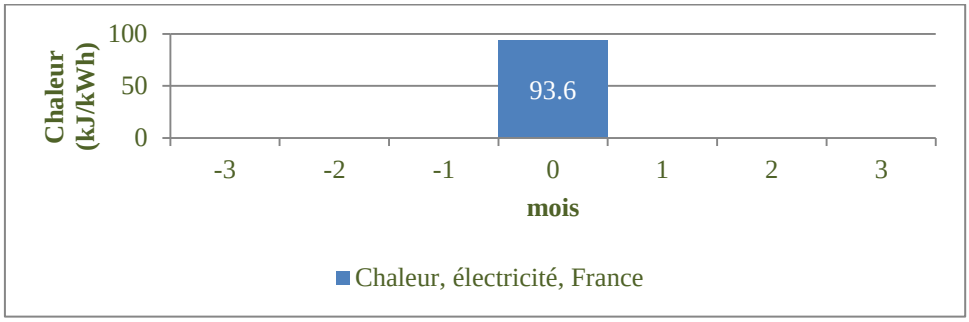


Figure a10.1 : Description de 5 des 6 distributions temporelles représentant les flux de processus nécessaires à la fabrication d'une installation photovoltaïque.

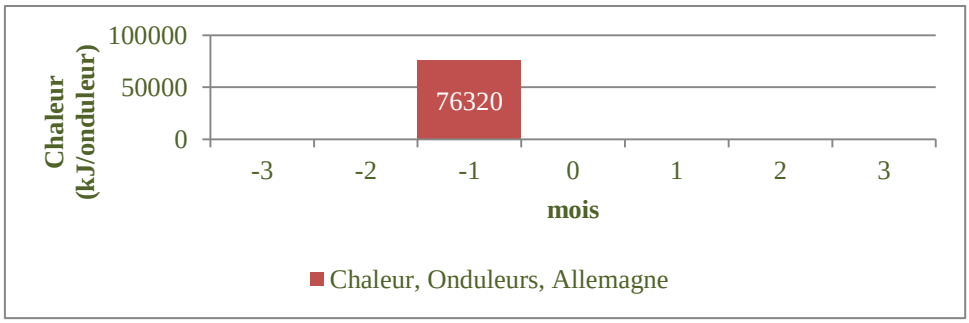
$f_{e0}(t)$



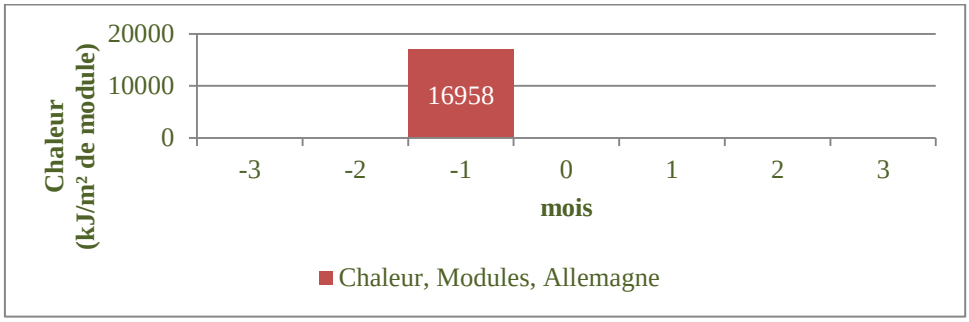
$f_{e1}(t)$



$f_{e2}(t)$



$f_{e5}(t)$



$f_{e6}(t)$

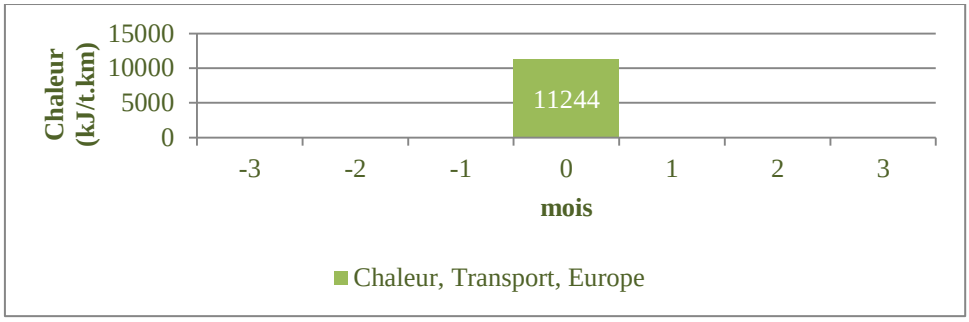


Figure a10.2 : Description de 5 des 6 distributions temporelles représentant les flux élémentaires liés à la fabrication de l'installation PV et de ces composantes.

ANNEXE 11 : CAS D'ETUDE #2

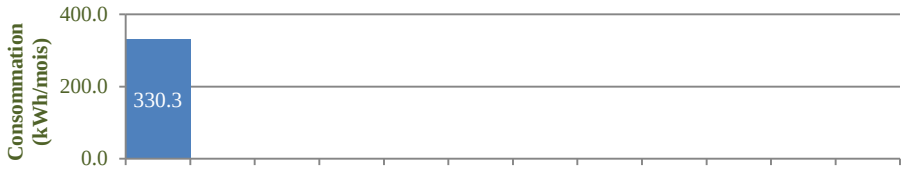
Cette annexe présente les distributions temporelles qui ont été définies pour modéliser la consommation mensuelle d'appoint des 4 catégories de scénario du cas d'étude sur les systèmes pour la production d'eau chaude sanitaire. La consommation 1 est retenue pour ces distributions.

L'information de ces distributions est plus pertinente lorsqu'elle est mise en correspondance avec les empreintes carbone du mix électrique français et de la combustion du gaz qui représentent les deux sources d'appoints utilisées pour la production d'eau chaude sanitaire. C'est pour cette raison que le tableau a11-1 décrit ces valeurs avant la présentation des distributions temporelles.

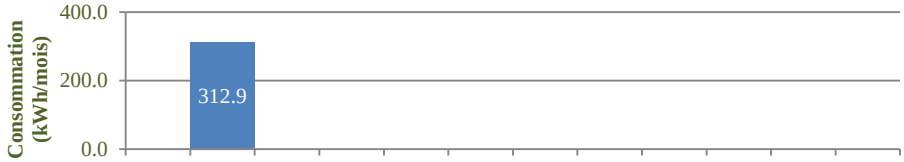
Tableau a11-a : Empreinte carbone des sources d'appoints utilisées dans les différentes installations du cas d'étude sur la production d'eau chaude sanitaire. Basée sur les statistiques de RTE.

Source d'appoint	CO_2	N_2O	Méthane	Non-dynamique	Part Dynamisé	Total
	kg CO_2 éq. / kWh	kg CO_2 éq. / kWh	kg CO_2 éq. / kWh	kg CO_2 éq. / kWh	%	kg CO_2 éq. / kWh
Electricité FR						
Janvier	0,1457	0,0008	0,0036	0,0230	87%	0,1732
Février	0,1251	0,0007	0,0038	0,0195	87%	0,1491
Mars	0,1265	0,0007	0,0038	0,0206	87%	0,1515
Avril	0,0961	0,0005	0,0033	0,0172	85%	0,1171
Mai	0,0837	0,0005	0,0027	0,0167	84%	0,1036
Juin	0,0616	0,0004	0,0022	0,0142	82%	0,0783
Juillet	0,0757	0,0004	0,0023	0,0162	83%	0,0946
Août	0,0403	0,0004	0,0014	0,0130	76%	0,0551
Septembre	0,0808	0,0004	0,0026	0,0162	84%	0,1001
Octobre	0,1239	0,0007	0,0037	0,0206	86%	0,1490
Novembre	0,1226	0,0007	0,0038	0,0202	86%	0,1271
Décembre	0,1312	0,0007	0,0033	0,0210	86%	0,1562
Gaz naturel						
Année 2010	0,2137	0,0006	0,0127	0,0401	85%	0,2671

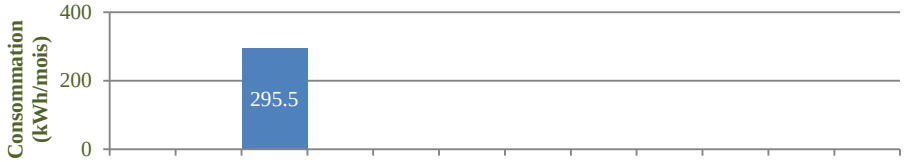
Janvier



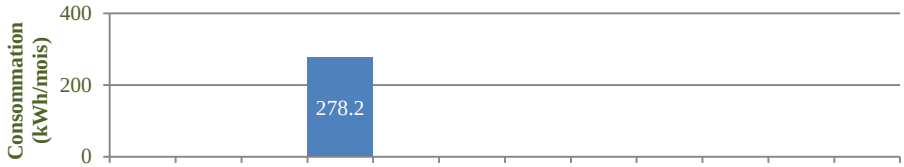
Février



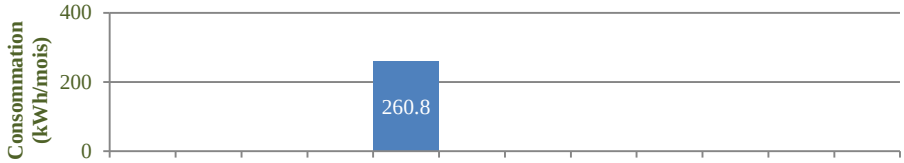
Mars



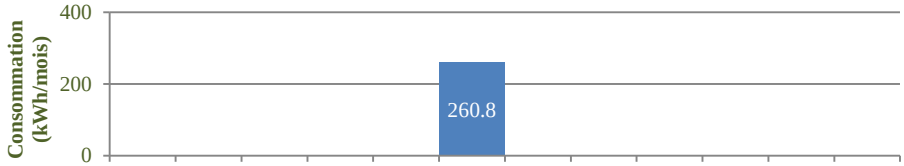
Avril



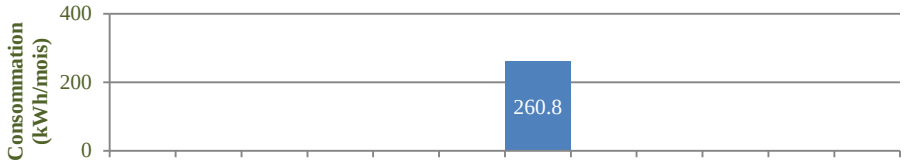
Mai



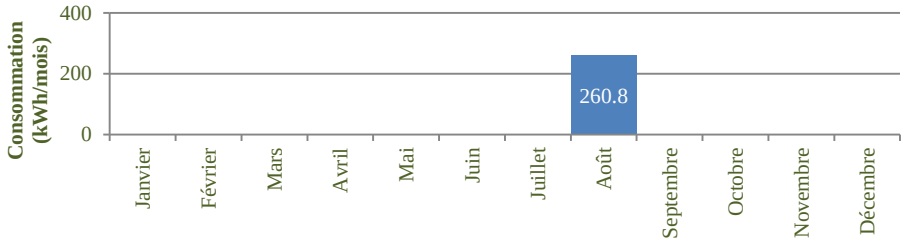
Juin



Juillet



Août



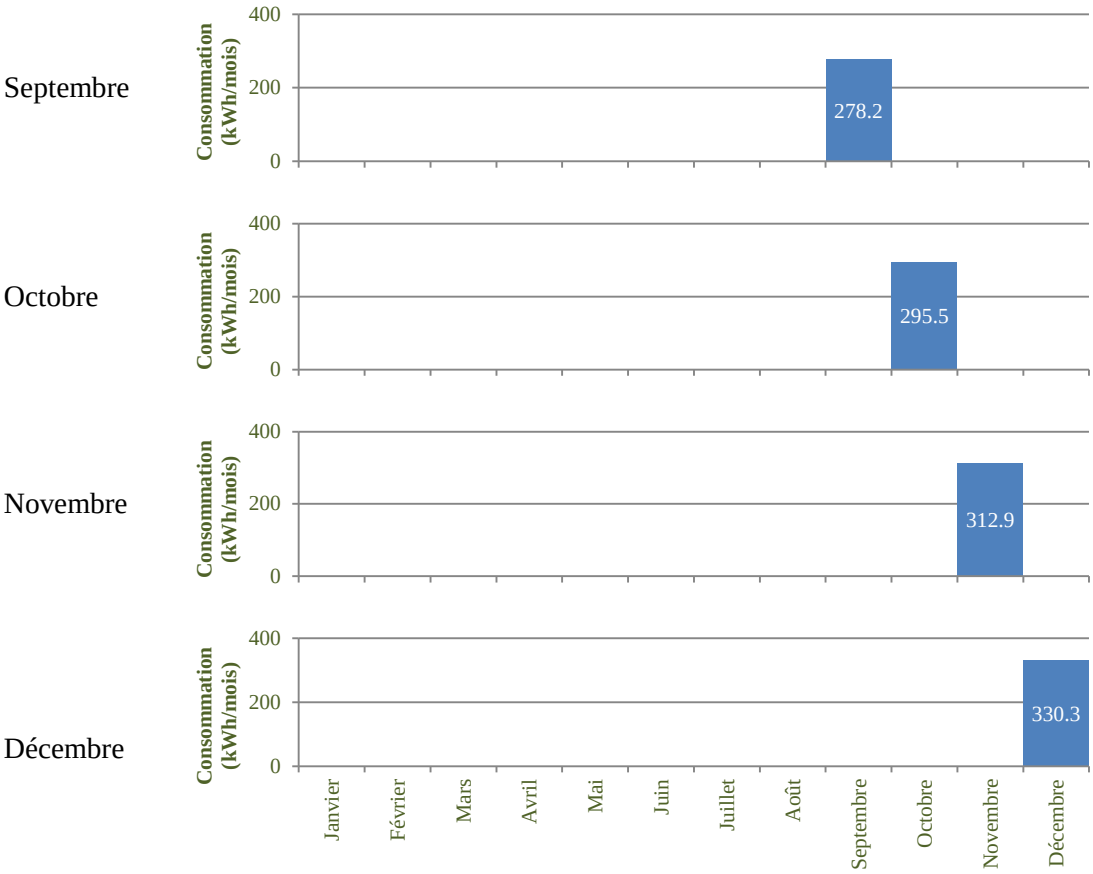
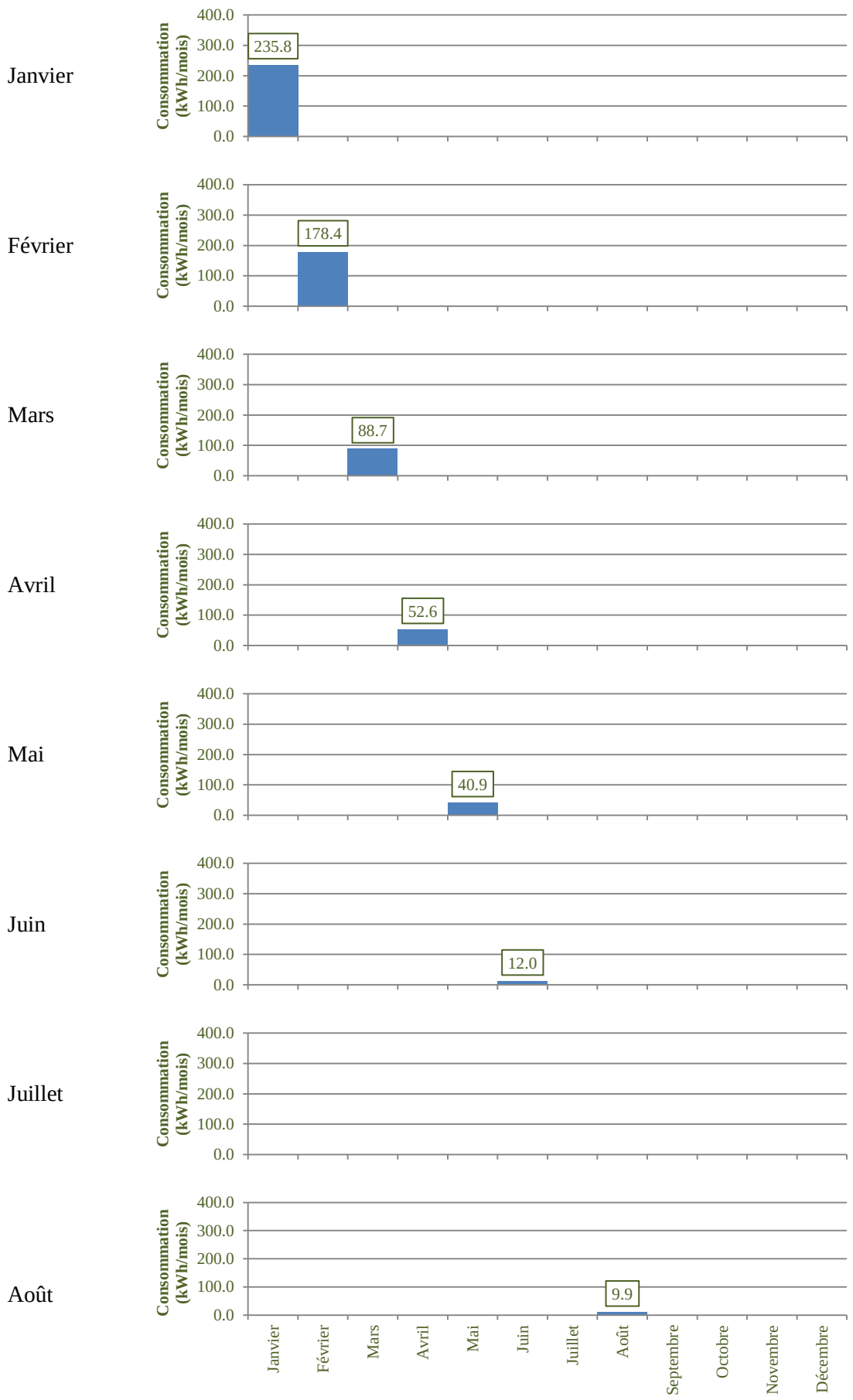


Figure a11.1 : Liste des distributions temporelles de consommation d'énergie d'appoint en fonction des différents mois de l'année pour les systèmes de type *I-GN* et *I-EL*. Ces distributions se répètent sur les 80 ans du cycle de vie considéré avec des hausses de 0,1% chaque année (perte d'efficacité du système) et une diminution de 1% par rapport à la valeur de 20 ans en arrière tous les 20 ans (rendement supérieur lors de lu remplacement de l'appoint).


Janvier
Février
Mars
Avril
Mai
Juin
Juillet
Août
Consommation (kWh/mois)
400.0
300.0
200.0
100.0
0.0
235.8
178.4
88.7
52.6
40.9
12.0
9.9
Janvier
Février
Mars
Avril
Mai
Juin
Juillet
Août
Septembre
Octobre
Novembre
Décembre

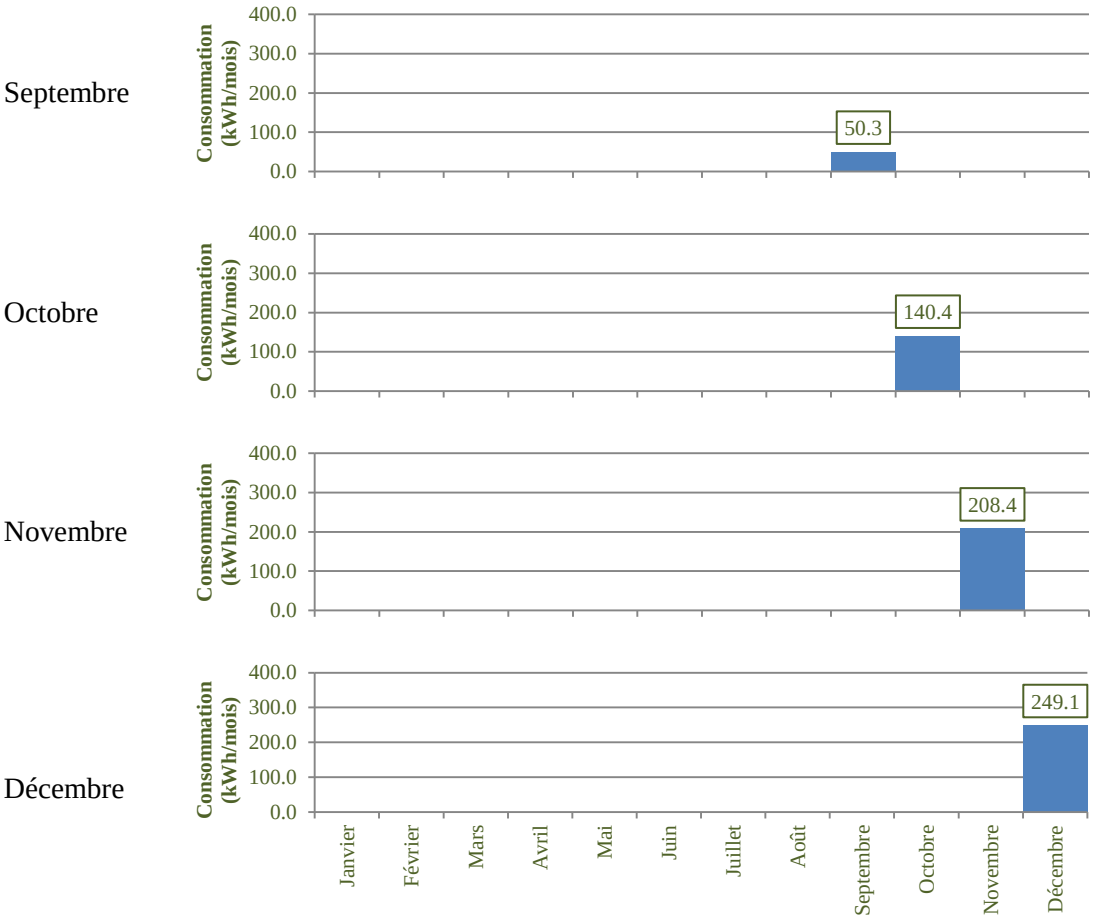


Figure a11.2 : Liste des distributions temporelles de consommation d'énergie d'appoint en fonction des différents mois de l'année pour les systèmes de type *I-ST+GN* et *I-ST+EL*. Ces distributions se répètent sur les 80 ans du cycle de vie considéré avec des hausses de 0,1% chaque année (perte d'efficacité du système) et une diminution de 1% par rapport à la valeur de 20 ans en arrière tous les 20 ans (rendement supérieur lors de lu remplacement de l'appoint).

BIBLIOGRAPHIE

Adra, Nadine, et al. (2009), 'Eco-conception d'un système solaire thermique individuel par l'analyse de son cycle de vie et son impact sur l'environnement', in ADEME (ed.), (Lyon, France), 85.

Alting, L., Hauschild, M., and Wenzel, H. (1997), 'Environmental assessment in product development', *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 355 (1728), 1373-86.

Bare, Jane, Pennington, David, and Haes, Helias (1999), 'Life cycle impact assessment sophistication', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 4 (5), 299-306.

Bellekom, S., Potting, J., and Benders, R. (2006), 'Feasibility of applying site-dependent impact assessment of acidification in LCA', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11 (6), 417-24.

Beloin-Saint-Pierre, Didier and Blanc, Isabelle (2011a), 'Enhanced structure path analysis: a new method to create spatiotemporally defined Life Cycle Inventory', *SETAC Europe annual meeting* (Milan).

Beloin-Saint-Pierre, Didier and Blanc, Isabelle (2011b), 'New spatiotemporally resolved LCI applied to photovoltaic electricity', *LCM* (Berlin).

Beloin-Saint-Pierre, Didier, et al. (2009), 'Environmental impact of PV systems: Effects of energy sources used in production of solar panels', in EU PVSEC (ed.), *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (Hamburg, Germany), 4517-20.

Blanc, Isabelle (2010), 'Evaluation des impacts environnementaux de filières énergie: vers une approche intégrée', (Université de Savoie).

Blanc, Isabelle, et al. (2009), 'Evaluation of the Environmental Accounting Methods for the assessment of global environmental impacts of traded goods and services - IMEA', (Bristol).

BP (2012), 'Statistical Review of World Energy', *Statistical Review of World Energy* May 7, 2012.

BP (2011), 'Statistical Review of World EnergyJune 2011', in BP (ed.), *Yearly Statistical Review* (2011; UK: BP), 45.

Brundtland, G. H. (1987), 'OUR COMMON FUTURE - CALL FOR ACTION', *Environmental Conservation*, 14 (4), 291-94.

Catton, William R. (1982), *Overshoot: The Ecological Basis of Revolutionary Change*, ed. University of Illinois (Illinois) 320.

Cole, R., et al. (1999), 'Dynamic LCA queries on trees', *Proceedings of the Tenth Annual Acm-Siam Symposium on Discrete Algorithms*.

Collet, Pierre, et al. (2011), 'Time and Life Cycle Assessment: How to Take Time into Account in the Inventory Step?', in Matthias Finkbeiner (ed.), *LCM - Towards Life Cycle Sustainability Management* (Berlin: Springer).

Collinge, W. O., et al. (2011), 'Enabling Dynamic Life Cycle Assessment of Buildings with Wireless Sensor Networks', *2011 Ieee International Symposium on Sustainable Systems and Technology (Issst)*, 6.

Collinge, William O., et al. (2012), 'Measuring Whole-Building Performance with Dynamic LCA: a Case Study of a Green University Building', in A. Ventura and C. de la Roche (eds.), *International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction* (Nantes, France: RILEM), 309-17.

Council, World Energy (2011), '2010 Survey of Energy Resources', in World Energy Council (ed.), *Survey of Energy Resources* (London, UK: World Energy Council), 608.

de Haes, Helias A. Udo, et al. (2004), 'Three Strategies to Overcome the Limitations of Life-Cycle Assessment', *Journal of Industrial Ecology*, 8 (3), 19-32.

de Wild-Scholten, Mariska (2011), 'Environmental Profile of PV Mass Production: Globalization', in EU PVSEC (ed.), *26th European Photovoltaix Solar Energy Conference* (Hamburg, Germany).

Defourny, Jacques and Thorbecke, Erik (1984), 'STRUCTURAL PATH ANALYSIS AND MULTIPLIER DECOMPOSITION WITHIN A SOCIAL ACCOUNTING MATRIX FRAMEWORK', *Economic Journal*, 94 (373), 111-36.

EEA (1999), 'Environmental indicators: Typology and overview', (©EEA edn.; Copenhagen: EEA).

Field, Frank, Kirchain, Randolph, and Clark, Joel (2000), 'Life-Cycle Assessment and Temporal Distributions of Emissions: Developing a Fleet-Based Analysis', *Journal of Industrial Ecology*, 4 (2), 71-91.

Finnveden, G., et al. (2009), 'Recent developments in Life Cycle Assessment', *Journal of Environmental Management*, 91 (1), 1-21.

Finnveden, Göran and Nilsson, Måns (2005), 'Site-dependent Life-Cycle Impact Assessment in Sweden (5 pp)', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10 (4), 235-39.

Friot, Damien (2009), 'Compatibilité environnementale et mondialisation', (MINES ParisTech).

Guinee, Jeroen B., et al. (2011), 'Life Cycle Assessment: Past, Present, and Futures', *Environmental Science & Technology*, 45 (1), 90-96.

Heijungs, Reinout and Suh, Sangwon (2002), *The Computational Structure of Life Cycle Assessment*, ed. Arnold Tukker (First edn., ECO-EFFICIENCY IN INDUSTRY AND SCIENCE, 11; Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic) 241.

Herfray, Grégory. and Peuportier, Bruno (2012), 'Evaluation of Electricity Related Impacts Using a Dynamic LCA Model', in A. Ventura and C. de la Roche (eds.), *International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction* (Nantes, France: RILEM), 300-08.

Hofstetter, P., et al. (2002), 'Tools for comparative analysis of alternatives: Competing or complementary perspectives?', *Risk Analysis*, 22 (5), 833-51.

Holten-Andersen, J., et al. (1995), 'Recommendations on strategies for integrated assessment of broad environmental problems', in European Environment Agency (EEA) (ed.), (Denmark: National Environmental Research Institute (NERI)).

Huijbregts, M. A. J., et al. (2001), 'Framework for modelling data uncertainty in life cycle inventories', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 6 (3), 127-32.

IEA (2012), 'Statistics', April 2012.

ILCD, European commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (2010), *Handbook - General Guide for Life Cycle Assessment - Detailed Guidance* (EUR 24708 EN; Luxembourg: Publication office of the european union) 394.

IPCC (2007), 'Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change', in IPCC (ed.), *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Geneva, Switzerland: IPCC), 104.

ISO, Organisation internationale de normalisation (2006a), 'ISO 14 044 : Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices', (NF EN ISO 14044:2006-10; 11, rue Francis de Pressené93571 La Plaine Saint-Denis CedexFrance: AFNOR), 49.

ISO (2006b), 'ISO 14 040 : Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre', (NF EN ISO 14040:2006-10; 11, rue Francis de Pressensé 93571 La Plaine Saint-Denis Cedex France: AFNOR), 23.

Jesinghaus, J. (1999), 'A European system of environmental pressure indices', in Joint Research Center (JRC) (ed.), *Environmental Pressure Indices Handbook: The Indicators Part 1: Introduction to the political and theoritical background* (First; Italy).

Jolliet, Olivier, et al. (2010), *Analyse du cycle de vie - Comprendre et réaliser un écobilan* (2e édition edn.; EPFL - Lausanne - Suisse: Presses polytechniques et universitaires romandes) 312.

Jungbluth, N., Dones, R., and Frischknecht, R. (2008), 'Life cycle assessment of photovoltaics: Update of the ecoinvent database', *Life-Cycle Analysis for New Energy Conversion and Storage Systems,* 1041, 33-42.

Kendall, A., Chang, B., and Sharpe, B. (2009a), 'Accounting for Time-Dependent Effects in Biofuel Life Cycle Greenhouse Gas Emissions Calculations', *Environmental Science & Technology,* 43 (18), 7142-47.

Kendall, Alissa, Chang, Brenda, and Sharpe, Benjamin A. (2009b), 'Capturing the Effects of the Timing of Emissions in Life Cycle Greenhouse Gas Assessments: A Case Study of Photovoltaic Technologies', in http://www.lcacenter.org/LCA9/LCA%20IX%20Abstracts.pdf (ed.), *Life Cycle Assessment IX* (Boston), 145.

Lenzen, M. and Crawford, R. (2009), 'The Path Exchange Method for Hybrid LCA', *Environmental Science & Technology,* 43 (21), 8251-56.

Lenzen, Manfred (2007), 'Structural path analysis of ecosystem networks', *Ecological Modelling,* 200 (3-4), 334-42.

Levasseur, A., et al. (2010), 'Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments', *Environmental Science & Technology,* 44 (8), 3169-74.

Levasseur, Annie (2011), 'Développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie dynamique pour l'évaluation des impacts sur le réchauffement climatique', (École Polytechnique de Montréal).

Levasseur, Annie, et al. (2012), 'Valuing temporary carbon storage', *Nature Clim. Change,* 2 (1), 6-8.

Manneh, R., Margni, M., and Deschenes, L. (2010), 'Spatial Variability of Intake Fractions for Canadian Emission Scenarios: A Comparison between Three Resolution Scales', *Environmental Science & Technology,* 44 (11), 4217-24.

Meinshausen, Malte, et al. (2009), 'Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2[thinsp][deg]C', *Nature,* 458 (7242), 1158-62.

Moriguchi, Yuichi and Terazono, Atsushi (2000), 'A simplified model for spatially differentiated impact assessment of air emissions', *The International Journal of Life Cycle Assessment,* 5 (5), 281-86.

Mutel, C. L. and Hellweg, S. (2009), 'Regionalized Life Cycle Assessment: Computational Methodology and Application to Inventory Databases', *Environmental Science & Technology,* 43 (15), 5797-803.

Mutel, Christopher L., Pfister, Stephan, and Hellweg, Stefanie (2011), 'GIS-Based Regionalized Life Cycle Assessment: How Big Is Small Enough? Methodology and Case Study of Electricity Generation', *Environmental Science & Technology,* 46 (2), 1096-103.

Nigge, Karl (2001), 'Generic spatial classes for human health impacts, part II', *The International Journal of Life Cycle Assessment,* 6 (6), 334-38.

Owens, J. W. (1997), 'Life-Cycle Assessment: Constraints on Moving from Inventory to Impact Assessment', *Journal of Industrial Ecology,* 1 (1), 37-49.

Pehnt, Martin (2006), 'Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies', *Renewable Energy,* 31 (1), 55-71.

Pennington, D. W., et al. (2005), 'Multimedia fate and human intake modeling: Spatial versus nonspatial insights for chemical emissions in Western Europe', *Environmental Science & Technology,* 39 (4), 1119-28.

Pennington, D. W. (2006), 'Risk and regulatory hazard-based toxicological effect indicators in life-cycle assessment (LCA)', *Human and Ecological Risk Assessment,* 12 (3), 450-75.

Pennington, D. W. (2004), 'Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice', *Environment International,* 30 (5), 721-39.

Potting, J. and Hauschild, M. Z. (2006), 'Spatial differentiation in life cycle impact assessment - A decade of method development to increase the environmental realism of LCIA', *International Journal of Life Cycle Assessment,* 11, 11-13.

Potting, José and Blok, Kornelis (1995), 'Life-cycle assessment of four types of floor covering', *Journal of Cleaner Production,* 3 (4), 201-13.

Potting, José and Hauschild, Michael (1997), 'Part II: spatial differentiation in life-cycle assessment via the site-dependent characterisation of environmental impact from emissions', *The International Journal of Life Cycle Assessment,* 2 (4), 209-16.

Potting, José, et al. (1998), 'Site-Dependent Life-Cycle Impact Assessment of Acidification', *Journal of Industrial Ecology,* 2 (2), 63-87.

Reap, John, et al. (2008), 'A survey of unresolved problems in life cycle assessment', *The International Journal of Life Cycle Assessment,* 13 (4), 290-300.

Rebitzer, G., et al. (2004), 'Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications', *Environment International,* 30 (5), 701-20.

Reich, N. H., et al. (2011), 'Greenhouse gas emissions associated with photovoltaic electricity from crystalline silicon modules under various energy supply options', *Progress in Photovoltaics,* 19 (5), 603-13.

Rosenbaum, Ralph K., Margni, Manuele, and Jolliet, Olivier (2007), 'A flexible matrix algebra framework for the multimedia multipathway modeling of emission to impacts', *Environment International,* 33 (5), 624-34.

Ross, Stuart and Evans, David (2002), 'Excluding site-specific data from the lca inventory: how this affects life cycle impact assessment', *The International Journal of Life Cycle Assessment,* 7 (3), 141-50.

RTE (2011), 'Statistiques de l'énergie électrique en France', in RTE (ed.), (La Défense, Paris: RTE EDF Transport), 35.

Seager, T. P., et al. (2009), 'Land Use and Geospatial Aspects in Life Cycle Assessment of Renewable Energy', *2009 Ieee International Symposium on Sustainable Systems and Technology* (IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology-ISSST; New York: Ieee), 216-21.

Shah, Viral and Ries, Robert (2009), '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,* 14 (4), 313-27.

Sonis, Michael, Hewings, Geoffrey J. D., and Sulistyowati, Sri (1997), 'Block structural path analysis: Applications to structural', *Economic Systems Research,* 9 (3), 265.

Sonnemann, Guido, et al. (2011), 'Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Database - "Shonan Guidance Principles"', in Evers David and Kapustka Larry (eds.), *SCP docuement* (Geneva: UNEP - SETAC), 158.

Suh, S. W. and Heijungs, R. (2007), 'Power series expansion and structural analysis for life cycle assessment', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12 (6), 381-90.

Suh, Sangwon (2009), *Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology* (Saint Paul, MN).

Weidema, BP., et al. (2012), 'Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3.', in ecoinvent (ed.), *Ecoinvent Report* (1; St. Gallen: The ecoinvent Centre: The ecoinvent Centre), 166.

Wiedmann, Thomas, et al. (2009), 'Development of a methodology for the assessment of global environmental impacts of traded goods and services - EIPOT', (Bristol).

Yi, Ilseuk, et al. (2007), 'Development of the interregional I/O based LCA method considering region-specifics of indirect effects in regional evaluation', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12 (6), 353-64.

Vers une caractérisation spatiotemporelle pour l'analyse du cycle de vie

RESUME : Cette thèse présente différents développements à la méthode analyse de cycle de vie (ACV) afin d'améliorer le niveau de considération des spécificités spatiotemporelles lors de la modélisation de systèmes. Ces développements abordent la question de la caractérisation des flux décrivant les systèmes. La discussion débute par une analyse des développements récents de la méthode ACV en ce qui concerne la considération des spécificités spatiotemporelles dans les différentes phases de cette méthode. Cette analyse identifie des lacunes quant à la pertinence des modes de caractérisation spatiale et temporelle existants. Un nouveau mode de caractérisation spatiotemporelle est alors proposé. La représentativité du système modélisé, le potentiel de précision de la caractérisation et le temps de travail nécessaire à la modélisation de différents systèmes sont trois critères importants qui ont été considérés pour la création de ce nouveau mode de caractérisation spatiotemporelle. Le nouveau mode proposé permet en particulier d'améliorer la généricité des processus définissant des systèmes dans différentes bases de données. Celui-ci permet ainsi de diminuer l'augmentation inévitable du travail lié à la caractérisation temporelle des systèmes. Le nouveau mode de caractérisation temporelle requiert toutefois une modification importante de la méthode de calcul des inventaires cycle de vie en raison de l'utilisation de distributions temporelles. La faisabilité de l'utilisation de ce nouveau mode et de la nouvelle méthode de calcul d'inventaire est ensuite démontrée par leurs mises en œuvre pour différents cas d'études de production d'énergie à partir de sources renouvelables. Les deux cas d'études retenus permettent de souligner l'intérêt d'une telle caractérisation spatiotemporelle accédant ainsi à une modélisation plus représentative des systèmes en fonction du niveau de précision retenu. Avec cette nouvelle approche nommée ESPA+, l'accès à ce niveau de représentativité s'accompagne cependant d'une diminution du potentiel de complétude de l'analyse. En effet, la méthode de calcul permet difficilement de dynamiser la totalité des systèmes modélisés.

Mots clés : Analyse du Cycle de Vie, Caractérisation spatiotemporelle, Filières énergétiques, Modélisation des systèmes, Gestion des Bases de Données, Calcul d'inventaire du cycle de vie.

Towards a Spatiotemporal Characterization for Life Cycle Analysis

ABSTRACT: This thesis presents various developments to the Life Cycle Assessment (LCA) method to improve the consideration of spatiotemporal specificities when modeling systems. These developments handle the question of how to characterize the various systems' flows. The discussion begins with an analysis of recent developments for the LCA method regarding the consideration of spatiotemporal characteristics in different phases of this method. This analysis identifies several weaknesses on how space and time are characterized today. A new spatiotemporal characterization mode is therefore proposed to minimize the adverse effects of existing characterization modes. Representativeness of the modeled system, potential accuracy of the characterization and the amount of time necessary for system modeling are three important criteria considered for the elaboration of this new spatiotemporal characterization mode. The new mode specifically improves the "genericity" of processes which are used to model systems in different databases. This "genericity" allows a reduction in the unavoidable workload increase related to the time characterization. The new method, however, requires a major change in the method of calculating life cycle inventories due to the use of temporal distributions. The feasibility of using this new method and the method of calculating inventory is then illustrated by their implementation through different case studies related to energy generation from renewable sources. The two case studies selected highlight the relevance of considering spatiotemporal characterization to model systems in a more representative way depending on the level of precision used. With this new approach, named ESPA+, this higher level of representation, however, brings a potential decrease of completeness for the analysis of the system. Indeed, it is difficult to model the spatiotemporal characteristics of a complete system.

Keywords: Life Cycle Assessment, Spatiotemporal characterization, Energy sector, System modeling, Database management, life cycle inventory calculation method.

MINES ParisTech

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY