



HAL
open science

Réflexions et contributions méthodologiques à l'ACV de bâtiments neufs : modélisation du contributeur énergie

Marine Fouquet

► To cite this version:

Marine Fouquet. Réflexions et contributions méthodologiques à l'ACV de bâtiments neufs : modélisation du contributeur énergie. Génie civil. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. NNT : 2015GREAA032 . tel-01301609

HAL Id: tel-01301609

<https://theses.hal.science/tel-01301609v1>

Submitted on 12 Apr 2016

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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Génie Civil et Sciences de l'Habitat**

Arrêté ministériel : 7 Août 2006

Présentée par

Marine FOUQUET

Thèse dirigée par **Monika WOLOSZYN**
et co-encadrée par **Alexandra LEBERT**

préparée au sein du **LOCIE UMR CNRS 5271**
et de **SISEO**

Réflexions et contributions méthodologiques à l'ACV de bâtiments neufs : modélisation du contributeur énergie

Thèse soutenue publiquement le **11 Décembre 2015**,
devant le jury composé de :

M. François GARDE

Professeur, Université de La Réunion, Président

M. Niklaus KOHLER

Professeur, Karlsruhe Institute of Technology, Rapporteur

Mme Isabelle BLANC

Professeure, MINES ParisTech, Rapporteur

M. Manuele MARGNI

Professeur, Polytechnique Montréal, Examineur

Mme Monika WOLOSZYN

Professeure, Université Savoie Mont Blanc, Directrice de thèse

Mme Catherine BUHE

Maître de conférences, Université Savoie Mont Blanc, Co-Directrice de thèse

M. Bernard SOUYRI

Maître de conférences, Université Savoie Mont Blanc, Co-directeur, Invité

Mme Alexandra LEBERT

Ingénieure Etudes et Recherche, CSTB, Encadrante, Invitée



Remerciements

A ceux qui pensent qu'une thèse est un processus solitaire, ils ne pourraient avoir plus tort ! Voilà maintenant le temps de remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Tout d'abord, je tiens à remercier ma directrice de thèse Monika Woloszyn et mes deux encadrants du LOCIE, Catherine Buhé et Bernard Souyri pour l'accompagnement qu'ils ont su m'apporter tout au long de ces trois ans de thèse.

Ma profonde gratitude va ensuite à Alexandra Lebert sans qui je n'aurais pas pu finir ce travail. Merci pour ton soutien, pour tous tes commentaires, pour tes corrections et pour mon apprentissage de l'art du schéma ! *Du coup*, merci !

Je tiens également à remercier les membres du jury pour l'attention qu'ils ont portée à mon travail : les rapporteurs Niklaus Kohler et Isabelle Blanc ainsi que les examinateurs François Garde et Manuele Margni. Leurs regards critiques et constructifs ont permis d'améliorer mon travail.

J'adresse mes remerciements à Julien Hans et à Jacques Chevalier pour m'avoir accueillie au sein de la division Environnement et Ingénierie du Cycle de Vie du CSTB de Grenoble ainsi que pour leurs soutiens et leur aide pendant ses trois ans.

Merci à l'équipe du CIRAIG pour m'avoir accueilli si chaleureusement pendant quelques mois ! Merci à Annie Levasseur et Manuele Margni pour ces échanges fructueux. Et merci à Laure et Leyla pour la découverte du ukulélé !

Je voudrais aussi remercier toute l'équipe EICV de Grenoble pour leur aide, leur accueil et tous les bons moments partagés ! Merci Marine, Francis, Seb, Nat, Gakdric, Nicoletta, Manu, Pierre, Laëtitia, Endrit et Géraldine ! Bonne chance Adélaïde !

Merci également aux membres de la direction Energie et Environnement avec qui j'ai pu échanger et travailler : Thierry, Pascal et Yassin. Bonne chance également à Clément et Simon pour la fin de leurs thèses ! Merci enfin à l'ensemble du CSTB Grenoble avec qui je n'ai pas forcément eu l'occasion de travailler mais plutôt de partager un thé, une galette, un repas et beaucoup de fous-rires ! Bang : Madame Emilie, Coco, Alexandre, Nico, et « un prénom qui commence par un C et qui finit par un N » !

Merci à tous mes amis ! Merci à Lise pour sa réaction positive quand je lui ai dit que j'allais faire une thèse et ses encouragements ! Merci à ceux qui m'ont soutenu quand je me demandais pourquoi j'avais accepté une thèse ! Merci aux équipes du 3831 et du 3565 pour ses 6 mois de fun ! Merci à tous ceux qui m'ont permis d'oublier le temps d'une soirée ou d'un weekend que je devais écrire un manuscrit ! Et plus particulièrement, merci enfin à tous les participants de la « doctorade » ! Ça valait le coup de travailler 3 ans rien que pour ce weekend !!

Merci à ma famille et surtout à mes parents pour les leçons d'efficacité énergétique improvisées : « il fait 19°, si tu as froid va mettre un pull ! », « les filles, pourquoi toutes les lumières sont-elles allumées ? C'est pas Versailles ici ! », etc... Et *vachement* merci Maman d'avoir eu le courage de relire et de corriger les fautes d'orthographe !

Enfin, dernier remerciement mais non des moindres, merci Dimitri de m'avoir écouté et supporté (presque tout le temps), d'avoir dormi dans des aéroports et voyagé entre Roanne, Grenoble et Montréal !

Table des matières

Remerciements	ii
Glossaire	xiv
Nomenclature	xvii
Introduction	1
1 État des lieux de l'évaluation énergétique et évaluation environnementale du bâtiment	3
1.1 La performance énergétique des bâtiments	3
1.1.1 Contexte général	3
1.1.2 Contexte économique et politique	5
1.1.3 Définition et calcul de la performance énergétique du bâtiment neuf	7
1.2 La performance environnementale des bâtiments	11
1.2.1 Contexte général	11
1.2.2 L'ACV de bâtiments dans la pratique	13
1.2.2.1 Concept général de l'ACV	13
1.2.2.2 L'ACV dans le secteur de la construction	14
1.2.2.2.1 La pratique : comment fait-on une ACV bâtiment ?	14
1.2.2.2.2 L'utilisation : quels acteurs réalisent des ACV de bâtiments ?	19
1.3 Vers des exigences de performances énergétiques et environnementales pour les bâtiments de demain ?	22
1.3.1 Points divergents entre évaluation énergétique et environnementale	22
1.3.1.1 Les différences dans la comptabilisation de l'énergie	22
1.3.1.2 Les différences dans les indicateurs énergétiques	24
1.3.2 Prise en compte de l'innovation	25
1.4 Conclusions et objectifs scientifiques de la thèse	29
2 Méthodologie de recherche	30
3 Bilan énergétique pour l'ACV bâtiment	34
3.1 Problématiques	35
3.2 Bâtiments producteurs d'énergie : influence du pas de temps sur le bilan énergétique d'un bâtiment	37

3.2.1	Définition du bilan import-export	37
3.2.2	Cas d'étude - Description	39
3.2.2.1	Profils de consommation	39
3.2.2.2	Profils de production	40
3.2.2.2.1	Données météorologiques	40
3.2.2.2.2	Description succincte de la modélisation de la production photovoltaïque	40
3.2.3	Indicateurs calculés	41
3.2.4	Résultats des cas d'étude	43
3.2.4.1	Référence temporelle de 10 minutes	43
3.2.4.2	Référence temporelle de 1 minute	46
3.2.4.3	Robustesse des résultats	50
3.2.4.3.1	Bâtiments non BEPOS	50
3.2.4.3.2	Logements collectifs	51
3.2.5	Conclusions	53
3.3	Extensions aux îlots producteurs d'énergie	54
3.3.1	Bilan énergétique	54
3.3.1.1	L'îlot comme un système global	54
3.3.1.2	Sans mutualisation	55
3.3.1.3	Avec mutualisation	55
3.3.2	Illustration	56
3.3.3	Conclusions	60
3.4	Synthèse et conclusions	61
4	Données environnementales des vecteurs énergétiques et variations temporelles	62
4.1	Types et caractéristiques des vecteurs énergétiques utilisés dans le bâtiment	63
4.2	Modélisation de mix énergétiques sur une base historique	65
4.2.1	Mix gazier	65
4.2.1.1	Modélisation des variations du mix gazier	65
4.2.1.2	Applications à des bâtiments neufs utilisant du gaz	69
4.2.2	Mix électrique	73
4.2.2.1	Modélisation des variations du mix électrique	73
4.2.2.2	Applications à des bâtiments neufs utilisant de l'électricité	76
4.2.2.3	Applications aux problématiques d'effacement et de smart-grid	79
4.2.2.4	Applications aux bâtiments producteurs d'énergie	83
4.2.2.4.1	Méthodologie	83
4.2.2.4.2	Résultats	85
4.2.2.4.3	Bâtiments producteurs d'énergie - Conclusions	89
4.3	Évolution à long terme des mix énergétiques et facteurs de caractérisation dynamiques	90
4.3.1	Problématiques	90
4.3.2	Méthodologie	91
4.3.2.1	Description des cas d'étude	91
4.3.2.2	Prise en compte du carbone biogénique	94

4.3.2.3	ACV dynamique	94
4.3.2.4	Aspects prospectifs	95
4.3.3	Résultats	96
4.3.3.1	Prise en compte du carbone biogénique	96
4.3.3.2	Approche dynamique	98
4.3.3.3	Aspects prospectifs	102
4.3.3.4	Conclusions	104
4.4	Conclusions générales	105
5	Sensibilité des résultats d'ACV du contributeur énergie et de l'ensemble bâtiment à la variabilité temporelle et méthodologique	107
5.1	Sensibilité des résultats d'ACV à la variabilité temporelle des vecteurs énergétiques	108
5.1.1	Cas d'étude : Bâtiments HQE Performance	109
5.1.2	Résultats	112
5.1.2.1	Sensibilité des résultats d'ACV à la variabilité temporelle du mix électrique à l'échelle du contributeur énergie	112
5.1.2.2	Sensibilité des résultats d'ACV à la variabilité temporelle du mix électrique à l'échelle du bâtiment	113
5.1.2.3	Comparaison avec les valeurs de référence HQE Performance	114
5.1.3	Conclusions	119
5.2	Influence des méthodologies de prise en compte de la production locale d'énergie	120
5.2.1	Prise en compte de la production locale à l'échelle du bâtiment	121
5.2.1.1	Cas d'étude - Description	124
5.2.1.1.1	Frontières du système	125
5.2.1.1.2	Consommations d'énergie pendant la phase d'usage	125
5.2.1.1.3	Données environnementales	126
5.2.1.2	Résultats du cas d'étude	126
5.2.2	Prise en compte de la production locale à l'échelle de l'îlot	132
5.2.2.1	Les différentes méthodes de calcul	132
5.2.2.1.1	Évaluation environnementale à l'échelle de l'îlot	132
5.2.2.1.2	Évaluation environnementale bâtiment par bâtiment	133
5.2.2.2	Application à un îlot de bâtiments producteurs d'énergie	134
5.2.2.2.1	Description	134
5.2.2.2.2	Résultats	135
5.2.3	Conclusions	138
5.3	Synthèse et conclusions	139
	Conclusion	140
	Bibliographie	153
A	Annexes du chapitre 3	154
A.1	Analyse des courbes de charges du lot n°1	154
A.2	Description détaillée de la modélisation photovoltaïque	158

A.3 Configurations des logements collectifs	160
B Annexes du chapitre 4	161
B.1 Données environnementales des sources de gaz	161
B.2 Résultats complémentaires : application mix gazier mensuel	164
B.3 Données environnementales des moyens de production électrique	167
B.4 Analyse des courbes de charges du lot n°3	169
B.5 Résultats complémentaires : Effacement	175
B.6 Résultats complémentaires : Bâtiments producteurs d'énergie	176
B.7 Description détaillée des maisons INCAS	178
B.8 Résultats complémentaires : aspects prospectifs	179
C Annexes du chapitre 5	180
C.1 Sensibilité des impacts environnementaux à la variabilité du mix électrique à l'échelle du contributeur énergie et à l'échelle du bâtiment	180
C.1.1 A l'échelle du contributeur énergie	180
C.1.2 A l'échelle du bâtiment	184
Résumé	188
Abstract	189

Liste des tableaux

1.1	Indicateurs environnementaux des normes EN 15804 (2012a) et EN 15978 (2012b)	17
3.1	Consommations et productions annuelles en énergie finale et énergie primaire pour les bâtiments de l’îlot	58
4.1	Consommations mensuelles de gaz calculées pour les différents cas d’études .	70
4.2	Description des 18 bâtiments du lot de courbes de charge n°3	77
4.3	Résultats sur les impacts environnementaux pour les deux configurations du bâtiment et les différents calculs (mix annuel vs. mix semi-horaire)	80
4.4	Choix d’observations des différents cas pour chaque binôme [logement-cas PV]	84
4.5	Lot N°1 : Incertitudes moyennes induites par les différentes méthodes de calcul	85
4.6	Lot N°2 : Incertitudes moyennes induites par les différentes méthodes de calcul	86
4.7	Lot N°1 et mix électrique 2014 : Incertitudes moyennes induites par les différentes méthodes de calcul	87
4.8	Comparaison mix électrique 2012 et 2014 : Incertitudes moyennes pour le lot N°1	88
4.9	Comparaison mix électrique 2012 et 2013 : Incertitudes moyennes pour le lot N°1	89
4.10	Description des scénarios pour les trois maisons	93
4.11	Description des scénarios prospectifs considérés	96
4.12	Comparaison des résultats obtenus avec les approches statiques et dynamiques pour des horizons de temps de 100 et 500 ans	100
4.13	Comparaison des résultats obtenus avec l’approche dynamique en fonction des hypothèses retenues pour la forêt pour des horizons de temps de 100 et 500 ans	102
4.14	Comparaison des résultats en pourcentage entre maisons obtenus avec les scénarios prospectifs et l’ACV dynamique pour des horizons de temps de 100 et 500 ans	103
4.15	Comparaison des résultats en pourcentage entre les scénarios prospectifs pour les quatre maison INCAS obtenus avec l’ACV dynamique pour des horizons de temps de 100 et 500 ans	103
4.16	Synthèse de l’influence en fonction de l’horizon temporel	105
4.17	Synthèse pas de temps recommandés pour le calcul du contributeur énergie .	106
5.1	Description succincte des 67 bâtiments de l’expérimentation HQE Performance 2012	109

5.2	Configurations de calcul pour les données énergétiques et les données environnementales du mix électrique	124
5.3	Bilans énergétiques import-export annuel et horaire pour le nZEB et le BEPOS	128
5.4	Méthode de la norme EN 15978 : Résultats d'ACV à l'échelle de l'îlot pour les différentes configurations spatiales de calcul (îlot, bâtiments par bâtiments avec et sans mutualisation)	136
5.5	Méthode des co-produits : résultats d'ACV à l'échelle de l'îlot pour les différentes configurations spatiales	137
5.6	Méthode des impacts évités : résultats d'ACV à l'échelle de l'îlot pour les différentes configurations spatiales	137
A.1	Configuration des logements collectifs créés à partir du lot de courbes de charges n°1	160
B.1	Données ecoinvent associées à chaque source de gaz naturel	161
B.2	Données ecoinvent associées à chaque filière de production électrique	167
B.3	Description des équipements des 18 bâtiments du lot de courbes de charge n°3	169
B.4	Résultats sur les autres indicateurs environnementaux pour les deux configurations du bâtiment et les différents calculs (mix annuel vs. mix semi-horaire)	175
B.5	Lot N°1 : Incertitudes moyennes induites par les différentes méthodes de calcul - Indicateurs complémentaires	176
B.6	Lot N°2 : Incertitudes moyennes induites par les différentes méthodes de calcul - Indicateurs complémentaires	176
B.7	Lot N°1 et mix électrique 2014 : Incertitudes moyennes induites par les différentes méthodes de calcul - Indicateurs complémentaires	177
B.8	Comparaison mix électrique 2012 et 2014 : Incertitudes moyennes pour le lot N°1 - Indicateurs complémentaires	177
B.9	Comparaison mix électrique 2012 et 2013 : Incertitudes moyennes pour le lot N°1 - Indicateurs complémentaires	177
B.10	Masse volumique, quantité et durée de vie des matériaux modélisés dans chaque maison INCAS	178
B.11	Comparaison des résultats en valeur absolue pour le forçage radiatif cumulé [W.an.m ⁻²] obtenus avec les scénarios prospectifs et l'ACV dynamique pour des horizons de temps de 100 et 500 ans	179

Table des figures

1.1	Consommations du bâtiment et répartition par vecteur énergétique en France en 2012 et 1973 (ADEME, 2013)	4
1.2	Évolution de la demande en énergie primaire pour le chauffage, l'ECS, l'éclairage, la ventilation et les auxiliaires pour les logements résidentiels utilisant des combustibles fossiles (Shanthirabalan et Rochard, 2014)	6
1.3	Potentiel d'amélioration de la performance énergétique pour trois types de bâtiments : existant, RT 2005 et RT 2012 (Valeurs pour un logement typique)	10
1.4	Évolution des émissions de CO ₂ dans l'air en France métropolitaine selon les différents secteurs d'activité (CITEPA, 2014))	11
1.5	Cadre méthodologique d'une analyse de cycle de vie (ISO, 2006b)	13
1.6	Différentes phases du cycle de vie d'un produit de construction (selon EN 15804) ou d'un bâtiment (selon EN 15978) et lien entre les deux approches (EeBGuide, 2012)	15
1.7	Liens entre l'approche par contributeur et les phases du cycle de vie d'un bâtiment dans le logiciel ELODIE	18
1.8	Résultats du projet HQE Performance pour les indicateurs Énergie Primaire Non Renouvelable et Changement Climatique pour une durée d'étude de 50 ans	20
1.9	Différences et conversions entre énergie primaire, finale et utile	23
1.10	Différences entre coefficients de conversion d'énergie finale à énergie primaire entre l'approche ACV et l'approche énergétique réglementaire	24
1.11	Variations horaires et journalières des émissions de GES de la production électrique française en 2012	27
2.1	Démarche de la thèse	31
3.1	Variations journalières de la consommation et de la production photovoltaïque pour une maison individuelle et identification des énergies auto-consommée, exportée et importée	36
3.2	Part d'électricité importée, R_{imp} , agrégée sur l'année, pour les logements BEPOS du lot n°1 en fonction du pas de temps du calcul d'exportation/importation	44
3.3	Erreur relative sur la part d'électricité importée pour les logements BEPOS du lot n°1 pour un pas de temps horaire par rapport à un pas de temps de référence de dix minutes	45
3.4	Erreur absolue en kWh _{EP} /(m ² .an) sur la part d'électricité importée pour les logements BEPOS du lot n°1 pour un pas de temps horaire par rapport à un pas de temps de référence de dix minutes	46

3.5	Part d'électricité importée agrégée sur l'année pour les logements BEPOS du lot n°2 sans systèmes réglementés alimentés par l'électricité (hors éclairage) en fonction du pas de temps du calcul d'exportation/importation	47
3.6	Erreur relative sur la part d'électricité importée pour les logements BEPOS du lot n°2 pour un pas de temps horaire par rapport à un pas de temps de référence de une minute	48
3.7	Erreur absolue en $\text{kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$ sur la part d'électricité importée pour les logements BEPOS du lot n°2 pour un pas de temps horaire par rapport à un pas de temps de référence de une minute	49
3.8	Erreur relative sur la part d'électricité importée pour les logements BEPOS du lot n°2 pour un pas de temps horaire par rapport à un pas de temps de référence de 10 minutes	49
3.9	Part d'électricité importée agrégée sur l'année pour les logements du lot n°1 sans systèmes réglementés alimentés par l'électricité (hors éclairage) en fonction du pas de temps du calcul d'exportation/importation – Cas d'une production photovoltaïque globalement à l'équilibre par rapport à la demande annuelle en moyenne pour l'ensemble des cas	51
3.10	Erreur relative et erreur absolue en $\text{kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$ sur la part d'électricité importée pour le lot de logements n°1 pour un pas de temps horaire par rapport à un pas de temps de référence de 10 minutes – Cas d'une production photovoltaïque plus faible que la demande	52
3.11	Part d'électricité importée agrégée sur l'année pour des logements collectifs sans systèmes réglementés alimentés par l'électricité (hors éclairage) en fonction du pas de temps du calcul d'exportation/importation et du nombre de logements	53
3.12	Illustration des frontières du bilan énergétique pour l'îlot comme système global	54
3.13	Illustration des frontières pour le bilan énergétique sans prise en compte de la mutualisation des usages	55
3.14	Illustration des frontières pour le bilan énergétique avec prise en compte de la mutualisation des usages	56
3.15	Bilan électrique en fonction du périmètre de calcul pour un îlot constitué de deux immeubles de logements collectifs (LC7 et LC25), d'une école primaire (EP) et d'une maison individuelle (MI), tous équipés de panneaux photovoltaïques	59
4.1	Répartition des énergies utilisées par le résidentiel en France en 2012 (ADEME, 2013)	63
4.2	Approvisionnement annuel en gaz naturel en France en 2013 (Eurostat, 2015)	65
4.3	Approvisionnement mensuel en gaz naturel en France en 2013 (Eurostat, 2015)	66
4.4	Variabilité mensuelle de l'impact sur le changement climatique d'un mètre cube de gaz en France entre 2008 et 2013	67
4.5	Variations mensuelles comparées de l'impact sur le changement climatique de la mise à disposition d'un kilowattheure de gaz et d'électricité selon nos modélisations en 2013 en France	68

4.6	Impacts de l'utilisation de gaz naturel pour obtenir 1 MJ de chaleur grâce à une chaudière à condensation en Europe	69
4.7	Différences induites pour la mise à disposition de gaz par l'utilisation d'un mix mensuel par rapport à un mix annuel pour un bâtiment de bureaux	71
4.8	Différences induites pour la mise à disposition de gaz par l'utilisation d'un mix mensuel par rapport à un mix annuel pour un bâtiment commercial	71
4.9	Différences induites pour la mise à disposition de gaz par l'utilisation d'un mix mensuel par rapport à un mix annuel pour un bâtiment de logements collectifs	72
4.10	Différences induites pour la mise à disposition de gaz par l'utilisation d'un mix mensuel par rapport à un mix annuel pour une maison individuelle	72
4.11	Variations horaire et journalière de l'impact sur le changement climatique de la mise à disposition d'un kilowattheure d'électricité en 2013 en France	75
4.12	Variabilité annuelle de l'impact sur le changement climatique de la mise à disposition d'un kilowattheure d'électricité en France entre 2012 et 2014	76
4.13	Différences induites par l'utilisation d'un mix électrique horaire par rapport à un mix annuel	78
4.14	Indicateur changement climatique pour le bâtiment RT1988 avec et sans effacement	81
4.15	Indicateur changement climatique pour le bâtiment RT2012 avec et sans effacement	82
4.16	Illustration des incohérences temporelles entre émissions et horizon de temps de l'étude (adapté de (Levasseur <i>et al.</i> , 2010))	90
4.17	Impact sur le Changement Climatique (100 ans) pour les maisons individuelles construites en béton ou en bois obtenu en utilisant l'ACV « traditionnelle »	97
4.18	Impact sur le Changement Climatique instantané(A) et cumulatif (B) pour les quatre maisons obtenu avec la méthode d'ACV dynamique	99
4.19	Impact sur le Changement Climatique instantané (A-C) et cumulatif (B-D) pour la maison en bois (OB) avec deux scénarios de fin de vie : enfouissement (A-B) et incinération (C-D) obtenu avec la méthode d'ACV dynamique et deux prises en compte de la gestion de la forêt	101
5.1	Distribution des impacts d'un kilowattheure consommé en France représentative de la variation horaire du mix électrique entre 2007 et 2014	108
5.2	Sensibilité des résultats à la variabilité temporelle du mix électrique à l'échelle du contributeur énergie pour le changement climatique	112
5.3	Sensibilité des résultats à la variabilité temporelle du mix électrique à l'échelle du bâtiment pour le changement climatique	114
5.4	Comparaison des boxplots de l'expérimentation HQE Performance et de notre étude pour toutes les typologies de bâtiments	115
5.5	Comparaison des boxplots de l'expérimentation HQE Performance et de notre étude pour les bâtiments de bureaux	116
5.6	Comparaison des boxplots de l'expérimentation HQE Performance et de notre étude pour les immeubles collectifs	117
5.7	Comparaison des boxplots de l'expérimentation HQE Performance et de notre étude pour les maisons individuelles	118

5.8	Trois méthodes possibles pour la prise en compte de la production locale d'énergie en ACV bâtiment	120
5.9	Illustration de l'évolution de la production photovoltaïque en fonction de la surface installée par rapport à la consommation pour une journée d'hiver . .	122
5.10	Évolution des quantités d'énergie importée, exportée et auto-consommée en fonction de la surface de PV installés pour une maison individuelle de 139 m ² (Calcul horaire agrégé sur une année)	123
5.11	Évolution de l'impact sur le changement climatique en fonction de la surface de PV pour les différentes méthodologies	124
5.12	Besoins et production moyens en énergie finale pour la maison INCAS BB en 2012 équipée de 1/ panneaux photovoltaïques et d'un ballon ECS à accumulation ou 2/ de panneaux photovoltaïques et solaires thermiques	126
5.13	Contribution relative aux différents impacts pour le cas de référence (Maison BB sans panneaux photovoltaïques) - Mix et consommation électrique annuel 2012 (Cas C)	127
5.14	Comparaison entre les différentes méthodologies de calculs : annuel (A), horaire (B) et bilan énergétique horaire et mix annuel (C) pour les deux configurations de la maison BB : nZEB et BEPOS. La maison sans PV est utilisée comme référence	130
A.1	Consommation annuelle des 49 courbes de charges du lot n°1 par m ² et par personne	154
A.2	Moyenne annuelle et maximum de puissance sur 10 minutes pour les 49 courbes de charges du lot n°1	155
A.3	Profil journalier moyen sur l'année normé par la consommation moyenne sur l'année	156
A.4	Indice de consommation mensuelle par rapport à la valeur moyenne annuelle	157
B.1	Différences d'impacts pour les différentes sources de gaz utilisées dans notre modélisation du mix gazier	162
B.2	Impacts sur le changement climatique de l'import en France de gaz naturel provenant d'Algérie, des Pays-Bas, de la Norvège et de la Russie	163
B.3	Différences induites pour la mise à disposition de gaz par l'utilisation d'un mix mensuel par rapport à un mix annuel pour un bâtiment de bureaux - Indicateurs complémentaires	164
B.4	Différences induites pour la mise à disposition de gaz par l'utilisation d'un mix mensuel par rapport à un mix annuel pour un bâtiment commercial - Indicateurs complémentaires	165
B.5	Différences induites pour la mise à disposition de gaz par l'utilisation d'un mix mensuel par rapport à un mix annuel pour un bâtiment de logements collectif - Indicateurs complémentaires	165
B.6	Différences induites pour la mise à disposition de gaz par l'utilisation d'un mix mensuel par rapport à un mix annuel pour une maison individuelle - Indicateurs complémentaires	166

B.7	Consommation annuelle des 18 courbes de charges du lot n°3 par m ² et par personne	171
B.8	Moyenne annuelle et maximum de puissance sur 10 minutes pour les 18 courbes de charges du lot n°3	172
B.9	Profil journalier moyen sur l'année normé par la consommation moyenne sur l'année pour le lot de courbes de charge n°3	173
B.10	Indice de consommation mensuelle par rapport à la valeur moyenne annuelle pour le lot de courbes de charge n°3	174
C.1	Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du contributeur énergie pour l'acidification	180
C.2	Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du contributeur énergie pour l'énergie non renouvelable	181
C.3	Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du contributeur énergie pour l'utilisation nette d'eau douce	181
C.4	Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du contributeur énergie pour les déchets dangereux	182
C.5	Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du contributeur énergie pour les déchets non dangereux	182
C.6	Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du contributeur énergie pour les déchets radioactifs	183
C.7	Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du bâtiment pour l'acidification	184
C.8	Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du bâtiment pour l'énergie non renouvelable	185
C.9	Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du bâtiment pour l'utilisation nette d'eau douce	185
C.10	Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du bâtiment pour les déchets dangereux	186
C.11	Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du bâtiment pour les déchets non dangereux	186
C.12	Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du bâtiment pour les déchets radioactifs	187

Glossaire

Analyse de cycle de vie (ACV) : Méthode d'évaluation systémique des impacts environnementaux d'un produit, bien ou service. Pour son cycle de vie complet, les intrants et les extrants sont compilés pour évaluer les potentiels impacts environnementaux.

ACV attributionnelle : ACV où l'évaluation des impacts environnementaux du système est réalisée en considérant un *status-quo* (passé, présent ou futur) et des interactions technologiques moyennes (Guiton et Benetto, 2013).

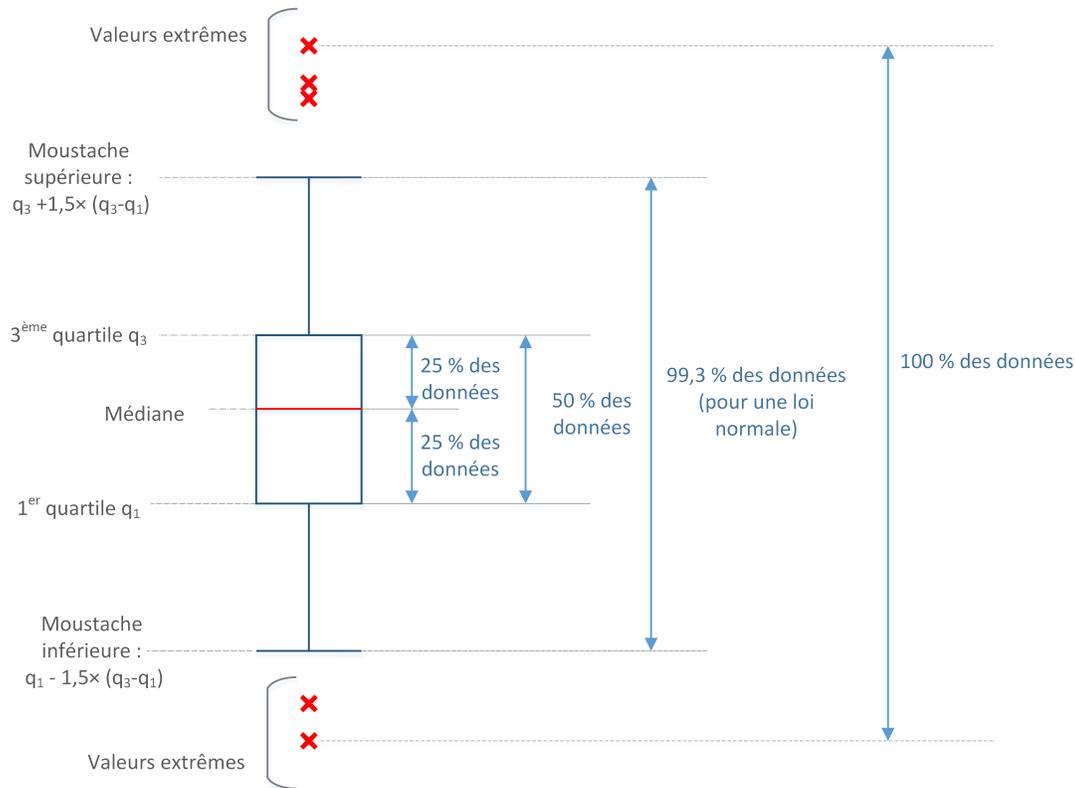
ACV conséquentielle : ACV où l'évaluation des impacts environnementaux est basée sur la chaîne de conséquences (directes et indirectes) induites par un changement sur le système étudié (Guiton et Benetto, 2013).

ACV décisionnelle : ACV où l'évaluation des impacts environnementaux du système est réalisée en considérant un *status-quo* (passé, présent ou futur) et des interactions entre processus basées sur des relations contractuelles et restant dans la sphère d'influence du décideur (Guiton et Benetto, 2013).

Allocation : Dans le cas d'un système générant plusieurs produits et co-produits, procédure d'attribution des impacts environnementaux entre les différents produits.

Analyse de sensibilité : Analyse qui a pour but d'évaluer la robustesse des résultats en déterminant l'influence de la variation d'une ou plusieurs données, des hypothèses ou des modèles sur la variation du résultat.

Boxplot : Mode de représentation d'une distribution de données. Les boxplots présentés dans ce manuscrit ont tous été réalisés avec Matlab (2015). Le schéma ci-dessous illustre les différentes notions rencontrées sur ces boxplot :



Donnée environnementale : Dans cette thèse, on appelle donnée environnementale le profil environnemental d'un produit (matériaux, énergie,...). Elle correspond aux impacts calculés de l'inventaire de cycle de vie correspondant au produit en question. Cette dénomination a été choisie en adéquation avec la base de données INIES qui regroupe les données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment.

Effacement : Cette notion est employée pour l'électricité et désigne la maîtrise de l'équilibre offre/demande grâce au "lissage" de la courbe de charge de demande.

Énergie finale : Énergie consommée par l'utilisateur ("au compteur"), elle prend en compte les rendements de systèmes. Dans ce manuscrit, lorsqu'une comptabilisation en énergie finale est utilisée, l'unité est suivie du sigle EF.

Énergie grise : De manière générale, elle correspond à la somme de tous les entrants énergétiques sur l'ensemble de cycle de vie d'un système.

Énergie primaire : Énergie brute c'est-à-dire non transformée (lignite, pétrole brute, houille, gaz naturel...). Dans ce manuscrit, lorsqu'une comptabilisation en énergie primaire au sens de la réglementation est utilisée, l'unité est suivie du sigle EP.

En ACV, ils existent deux indicateurs d'énergie primaire : renouvelable et non renouvelable. Dans ce manuscrit, l'unité utilisée pour ces indicateurs est le kWh (aucun sigle supplémentaire n'est utilisé).

Énergie utile : Elle correspond aux besoins d'un bâtiment sans prise en compte des équipements et systèmes.

Facteur de caractérisation : Facteur établi à partir d'un modèle de caractérisation qui est utilisé pour convertir les résultats de l'analyse de l'inventaire du cycle de vie dans l'unité commune de la catégorie d'impact.

GES (Gaz à Effet de Serre) : Gaz atmosphériques qui contribuent au changement climatique

Jours EJP (Effacement des Jours de Pointe) : Pour certains abonnements d'électricité, l'utilisateur est invité à restreindre sa consommation d'électricité (via un tarif plus élevé du kilowatt-heure) lors de certains jours : les jours EJP.

Mix énergétique : Dans ce manuscrit, un mix énergétique désigne le mélange des sources de production ou d'approvisionnement pour arriver à la production à l'échelle du territoire français.

nZEB (nearly Zero Energy Building) : Un bâtiment qui produit presque plus d'énergie qu'il n'en consomme sur l'année.

SED (Simulation Énergétique Dynamique) : Calcul de l'évolution temporelle des besoins et consommations énergétiques d'un bâtiment.

SHON (Surface Hors Œuvre Nette) : Somme des surfaces des planchers de chaque niveau moins tout ce qui n'est pas aménageable (sous-sols et combles non aménageables, toitures-terrasses, balcons, loggias, surfaces non closes du rez-de-chaussée et garages). Dans ce manuscrit, sauf mention contraire, les surfaces utilisées pour les cas d'études correspondent à la SHON.

SHON_{RT} (Surface Hors Œuvre Nette pour la Réglementation Thermique) : Pour une maison individuelle ou un bâtiment de logements collectifs, somme des surfaces de plancher à chaque niveau de la construction, après déduction des surfaces de locaux sans équipements de chauffage. Pour les bâtiments non utilisés comme habitation, la SHON_{RT} est le résultat de la multiplication de la surface utile (surface des planchers moins celles occupées par les murs, les cloisons, poteaux, gaines, escaliers) d'un bâtiment par un coefficient dépendant de l'usage.

Taux de couverture : Dans ce manuscrit, il correspond au ratio entre la production locale annuelle d'énergie renouvelable et la consommation annuelle (tous usages confondus) d'un bâtiment.

Vecteurs énergétiques : Dans ce manuscrit, ils désignent les différents types d'énergie pouvant être utilisés pour répondre aux besoins énergétiques d'un bâtiment.

Nomenclature

C_{BL}	Coefficient de baisse de rendement à basse lumière [-]
$E_{imp.,exp.,auto.}$	Énergie importée, exportée ou auto-consommée par le bâtiment lorsque de la production locale d'énergie est prise en compte [kWh]
ϵ_c	Emissivité du ciel [-]
η_{ond}	Rendement d'onduleur [%]
η_{STC}	Rendement d'un module photovoltaïque (PV) dans les conditions standards de test [%]
G	Ensoleillement total incident [W/m ²]
G_{STC}	Irradiance de référence pour les conditions standards de test [W/m ²]
H_{tot}	Coefficient d'échange convectif et radiatif [W/K]
H_{conv}	Coefficient d'échange convectif [W/K]
H_{rad}	Coefficient d'échange radiatif [W/K]
\vec{I}	Vecteur des impacts environnementaux
M_s	Inertie d'un module PV [J/K]
μ	Coefficient de température d'un module PV [°C ⁻¹]
n_G	Ratio entre l'ensoleillement total et l'irradiance de référence [-]
N	Observation annuelle ou horaire
$P_{appelée,produite}$	Puissance appelée sur le réseau ou produite par une installation locale d'énergie renouvelable [W]
P_{Nom}	Puissance nominale d'onduleur [W]
P_{out}	Puissance en sortie d'onduleur [W]
P_{PV}	Puissance en sortie d'un mètre carré de module photovoltaïque [W]
Q_t	Flux solaire thermique absorbé par un module PV [W/m ²]
R	Ratio de modification du rendement d'un module PV par rapport aux conditions standard de test [-]
T_a	Température de l'air [°C ⁻¹]
T_{ciel}	Température du ciel [°C ⁻¹]
T_{mod}	Température instantanée du module [°C ⁻¹]
T_{STC}	Température de référence dans les conditions standards [°C ⁻¹]
τ_α	Coefficient d'absorption solaire [-]
Δt	Pas de temps [min]
W_C	Puissance crête standard [Wc/m ²]

Introduction

Depuis 1974, année de l'apparition des exigences thermiques sur les bâtiments en France, les réglementations thermiques n'ont cessé d'évoluer pour rendre les bâtiments de plus en plus performants énergiquement. La réglementation actuelle, RT 2012, fixe par exemple pendant l'utilisation, la consommation annuelle maximale d'un bâtiment neuf à 50 kWh d'énergie primaire par mètre carré pour les cinq usages dits "réglementaires" (chauffage, eau chaude sanitaire, ventilation et autres auxiliaires, éclairage et climatisation).

Moins consommer d'énergie contribue à diminuer les impacts sur l'environnement. Mais le bâtiment doit absolument être considéré sur l'ensemble de son cycle de vie, et non seulement sur la seule phase d'utilisation, pour estimer les véritables gains d'une telle diminution. Par exemple, Blengini et Di Carlo (2010) montrent que la quantité d'énergie économisée par l'isolation d'une maison est réduite de 10 à 2,1 quand "l'énergie grise" des matériaux est considérée, et non pas seulement la phase d'usage. Or, au regard des engagements français et européen pris pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) (Programme fixant les Orientations de la Politique Énergétique, dit Loi POPE, 2005), il apparaît indispensable d'introduire d'autres indicateurs que la seule consommation d'énergie comme critère de performance d'un bâtiment.

L'évaluation environnementale des bâtiments peut se baser sur l'analyse de cycle de vie (ACV). Cette dernière permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un bâtiment depuis l'extraction des matières premières pour les produits de construction jusqu'à la déconstruction et la fin de vie, en passant par la phase d'utilisation avec les consommations d'énergie, d'eau et l'entretien du bâtiment.

Créée dans les années 1970 pour le secteur du packaging, l'ACV s'est peu à peu généralisée à d'autres secteurs (Hunt et Franklin, 1996) dont celui de la construction (Kohler, 1986). En 1997, les premières normes ISO sur la méthodologie ACV sont publiées (ISO, 2006b,a). Elles seront suivies par des normes européennes spécifiques aux produits et matériaux de construction (CEN, 2012a) ainsi qu'au bâtiment (CEN, 2012b).

Pour généraliser l'utilisation de l'ACV dans le secteur de la construction, différents outils dédiés à l'ACV bâtiment avec leurs données, leurs méthodologies et leurs indicateurs propres ont été développés (Peuportier *et al.*, 2004). Une harmonisation et une consolidation des méthodologies semblent inévitables pour obtenir des résultats opposables dès lors que l'ACV devient une base pour l'aide à la décision et l'évaluation. Des travaux ont déjà porté sur la simplification de l'ACV bâtiment (Lasvaux, 2010) ou les incertitudes de l'ACV bâtiment liées aux composants (Hoxha, 2015).

Par ailleurs, même si pour les bâtiments à basse consommation la part des produits et des matériaux de construction est de plus en plus grande dans les impacts environnementaux,

la part relative aux consommations d'énergie en phase exploitation reste un des principaux contributeurs de ces impacts (Lebert *et al.*, 2013).

De plus, le développement des bâtiments producteurs d'énergie et des systèmes de gestion de la demande électrique soulève de nouvelles problématiques dans le secteur du bâtiment ainsi que dans celui des réseaux énergétiques. Par exemple, l'approche actuelle en ACV tend à utiliser des résultats de simulations thermiques dynamiques agrégés à l'année alors que pour évaluer les avantages et inconvénients de tels systèmes une granulométrie temporelle fine (inférieure à l'année) est plus adaptée (Voss *et al.*, 2012).

Pour résumer, aujourd'hui, la réglementation thermique est la base de l'évaluation énergétique. Demain, l'évaluation environnementale sera basée sur l'ACV ; cette dernière devra donc évaluer tout en permettant l'innovation. Cependant, le lien entre l'évaluation énergétique et l'évaluation environnementale des bâtiments est encore à consolider ; en particulier, pour utiliser l'ACV en tant qu'approche réglementaire et pour prendre en compte les développements et les innovations dans le bâtiment.

Une démarche de recherche est proposée dans cette thèse pour fournir des réponses, même partielles, à ces problématiques opérationnelles. L'objectif principal de ces travaux est l'adaptation de l'ACV aux nouvelles problématiques relatives à la prise en compte de l'énergie dans le bilan environnemental du bâtiment, en particulier la production locale d'énergie et la gestion de la demande.

Le champ de l'étude sera majoritairement centré sur la contribution de la consommation d'énergie en phase exploitation (appelé contributeur énergie) dans le bilan environnemental d'un bâtiment. Pour rester exhaustif, les supports de l'étude seront des bâtiments tertiaires ou résidentiels proches des exigences de la réglementation thermique actuelle (bâtiments passifs ou à basse consommation (BBC)). Des cas de bâtiments producteurs d'énergie ainsi que de gestion de la demande énergétique seront également pris en compte. Par ailleurs, le passage de l'évaluation d'un bâtiment à celle d'un îlot sera abordé.

Le prochain chapitre présente un contexte général sur l'évaluation énergétique et environnementale des bâtiments en France et soulève les enjeux scientifiques. Il est suivi par une présentation de la démarche de la thèse et du plan de ce document.

Chapitre 1

État des lieux de l'évaluation énergétique et évaluation environnementale du bâtiment

1.1 La performance énergétique des bâtiments

1.1.1 Contexte général

En 2008, 40 % de l'énergie finale mondiale est consommée par les secteurs résidentiels et tertiaires (Laustsen, 2008). En 2012 en France, le constat est le même : la consommation finale des bâtiments résidentiels et tertiaires est de 68,7 Mtep soit environ 45 % de la consommation finale énergétique loin devant les transports (32 %) et l'industrie (18 %) (ADEME, 2013). Cette consommation finale due au secteur du bâtiment est stable depuis quelques années mais aura auparavant été en augmentation régulière pendant 30 ans. En effet, en 1973, l'industrie représentait 36 % de la consommation d'énergie en France et le résidentiel-tertiaire 42 %, soit 56.4 Mtep (SOeS, 2013).

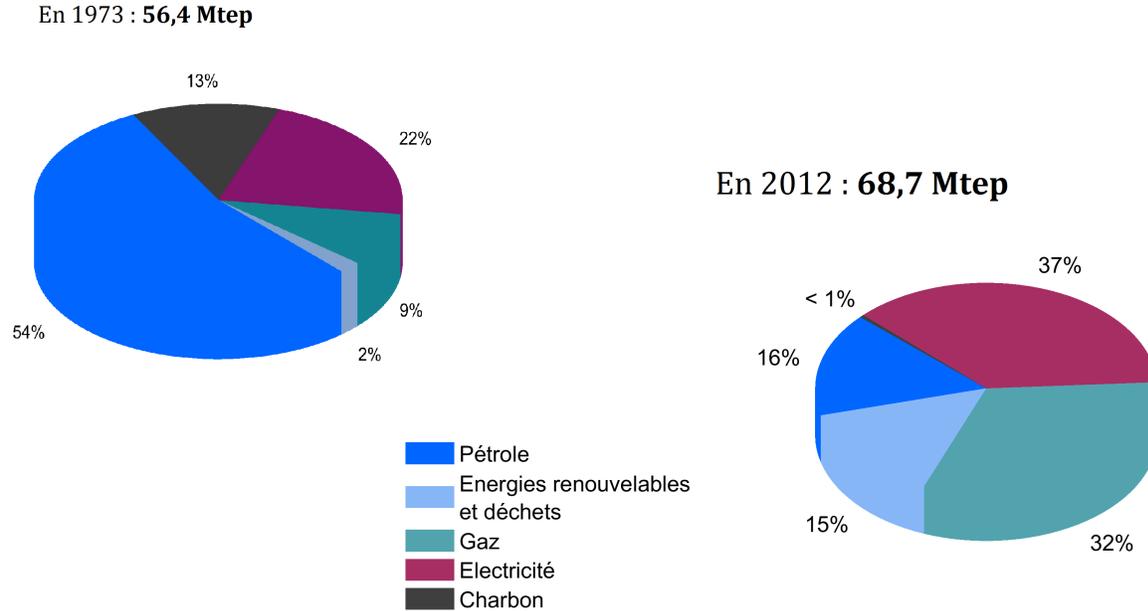


FIGURE 1.1 – Consommations du bâtiment et répartition par vecteur énergétique en France en 2012 et 1973 (ADEME, 2013)

Sur la figure 1.1, nous observons que la consommation du secteur du bâtiment a augmenté de plus de 12 Mtep entre 1973 et 2012. Par ailleurs, une évolution des vecteurs énergétiques utilisés dans le bâtiment a eu lieu. En 1973, le pétrole était principalement utilisé (54 %) alors qu’aujourd’hui les besoins énergétiques sont principalement assurés par l’électricité (37 %) et le gaz (32 %). Cette augmentation et ce changement de vecteurs énergétiques sont dus :

- à l’accroissement du parc bâti : entre 1984 et 2008, la population a augmenté de 13 % mais le nombre de logements a crû de 30 %, passant de 25,5 millions à plus de 32 millions (Centre d’analyse stratégique, 2011) ;
- à l’extension de la surface moyenne des logements : 82 m² en 1984 à 91 m² en 2006 (INSEE, 2006) ;
- à la diminution du nombre de personnes par logement : 2,5 personnes en moyenne en 1992 à 2,3 personnes en moyenne en 2006 (INSEE, 2006) ;
- à l’apparition de nouveaux besoins contribuant à une forte augmentation de la consommation d’électricité (électroménager, éclairage, bureautique...). (MEDDE, 2004).

Pour pallier cette augmentation, en 1974, suite au premier choc pétrolier, une réglementation thermique a été mise en place pour les bâtiments neufs. Ces exigences sur la performance énergétique des bâtiments n’ont cessé d’évoluer (respectivement en 1988, 2000 et 2005) jusqu’à la réglementation thermique 2012 (RT 2012). L’objectif politique de cette RT 2012 est de limiter à 50 kWh_{EP}/m²/an¹ les consommations de chauffage, de refroidissement, d’eau chaude sanitaire (ECS), d’éclairage et des auxiliaires. La réduction attendue à l’horizon 2020

1. Une description des différentes comptabilisations énergétiques utilisées dans cette thèse est disponible dans le glossaire au terme énergie primaire.

pour le secteur résidentiel est de 1,15 Mtep (MEDDE, 2013). Dans le même horizon temporel, la réglementation thermique doit évoluer encore et les bâtiments neufs devront produire plus d'énergie qu'ils n'en consomment, devenant donc des bâtiments à énergie positive (BEPOS) (Article 4 Loi Grenelle 1 2009).

Cependant, les parcs immobiliers des pays développés ont une forte inertie, leur taux de renouvellement étant de l'ordre de 1 % par an (Meijer *et al.*, 2009). Les effets de la mise en place de la RT 2012 ne seront pas visibles avant quelques années et le parc immobilier français reste, à ce jour, fortement consommateur (ADEME, 2013). De plus, il joue un rôle prépondérant dans les pointes historiques de consommation électrique. Ce dernier point est loin d'être négligeable car l'impossibilité de stocker massivement l'électricité oblige à dimensionner le système de production en fonction de la puissance maximale appelée (Marignac *et al.*, 2010). La thermosensibilité de la demande, caractérisée par le "gradient d'hiver" i.e. la puissance additionnelle appelée lors de la baisse d'un degré de la température extérieure, n'a cessé de croître; le gradient d'hiver est aujourd'hui de 2400 MW/°C et a augmenté de 30 % depuis 2002 (RTE, 2014). Ainsi, les actions dites de maîtrise de la demande d'énergie (MDE) s'impose pour réduire la consommation du secteur du bâtiment et sa contribution à la pointe de demande électrique. Ces actions font intervenir les producteurs et les consommateurs autour de la maîtrise totale de la demande, de la maîtrise de la croissance de la pointe et des développements des effacements de consommation (Badreddine, 2012). A titre d'exemple, les certificats d'économies d'énergie (CEE) (Économies d'énergies des fournisseurs d'énergie via la promotion de l'efficacité énergétique auprès de leurs clients) permettront de réduire la consommation de 2,23 Mtep par an d'ici 2015 (MEDDE, 2013).

1.1.2 Contexte économique et politique

Sur le plan économique, le bâtiment est un secteur de poids puisqu'il emploie 1,14 million de salariés et en 2013 son chiffre d'affaires est estimé à 126 milliards d'euros soit environ 5 % du produit intérieur brut (PIB) (FFB, 2014). Cependant, ce secteur connaît des difficultés depuis quelques années avec des taux de croissance faibles (KPMG, 2013). La Fédération Française du Bâtiment pointe du doigt la réglementation comme un facteur d'accroissement des coûts. Pour une construction neuve, elle évalue à environ 8 % la hausse de prix engendrée par les réglementations sur la performance énergétique des bâtiments (Tommasini *et al.*, 2013).

Pourtant, à l'échelle nationale, la facture énergétique s'élève en 2012 au chiffre record de 68,7 milliards d'euros, dépassant ainsi le déficit commercial du pays (SOeS, 2013) et devrait donc être maîtrisée. A l'échelle des ménages, la facture énergétique moyenne en 2013 est de 1 800 € (Botin *et al.*, 2014). La facture moyenne annuelle de chauffage est autour de 900 € mais présente une grande hétérogénéité puisqu'elle baisse à 250 € pour une maison "basse consommation" et monte à plus de 1800 € pour une maison mal isolée (MEDDE, 2011). Le gain induit par la mise en place de la RT 2012 n'est donc pas négligeable et compense l'investissement supplémentaire à la construction (MEDDE, 2010).

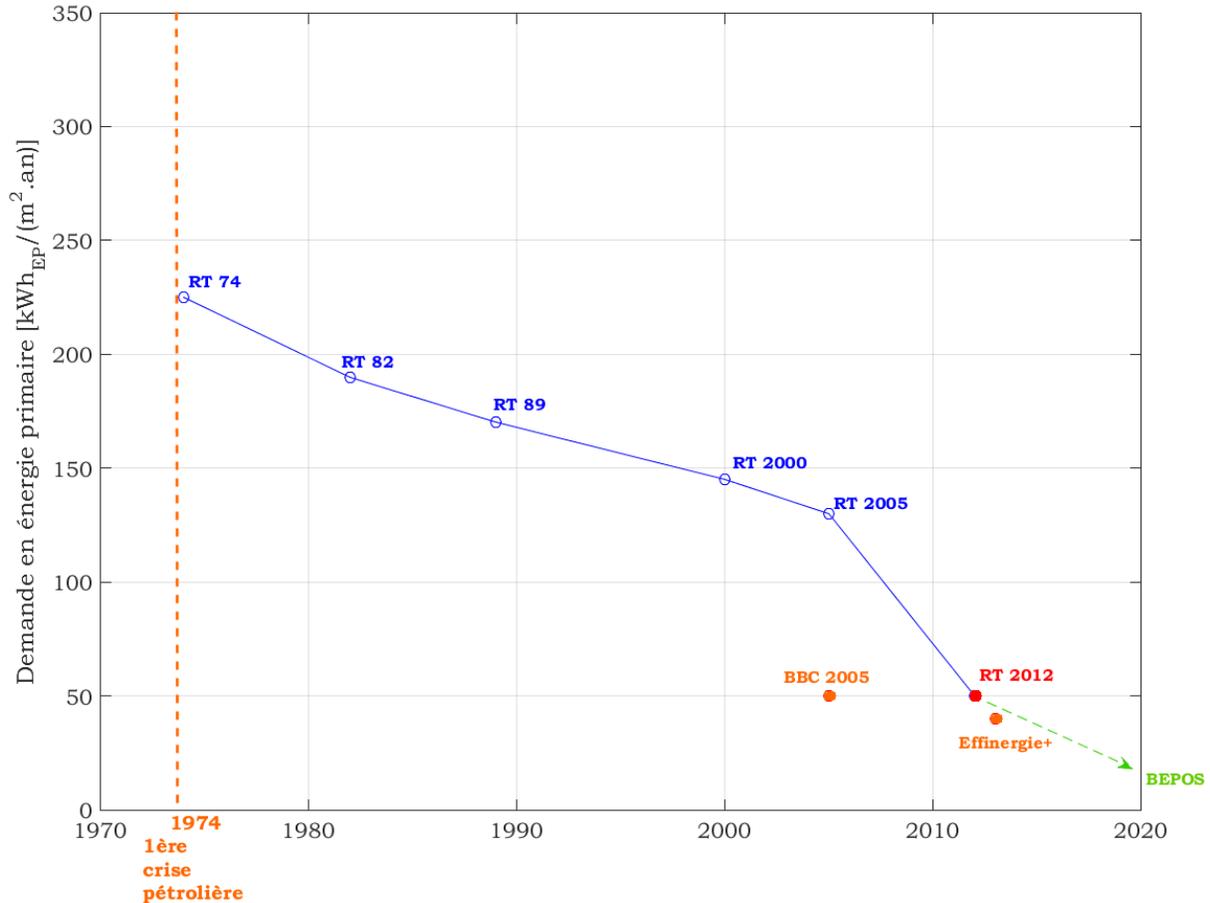


FIGURE 1.2 – Évolution de la demande en énergie primaire pour le chauffage, l’ECS, l’éclairage, la ventilation et les auxiliaires pour les logements résidentiels utilisant des combustibles fossiles (Shanthirabalan et Rochard, 2014)

D’un point de vue politique, la RT 2012 marque un tournant dans l’évolution des différentes réglementations thermiques. En effet, comme le montre la figure 1.2, la réduction entre le niveau d’exigence de la RT 2005 et celui de la RT 2012 est d’environ 80 kWh_{EP}/(m².an) i.e. l’équivalent de la réduction obtenue sur 30 ans entre la RT 74 et la RT 2005. Cette volonté d’amélioration est également visible avec les débats sur le projet de loi sur la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (2014) à l’Assemblée Nationale, qui ont élargi la notion des BEPOS à celle de territoire à énergie positive (territoire qui produit plus d’énergie qu’il n’en consomme).

La mise en place de ces réglementations ambitieuses s'appuie tout d'abord sur la mise en place de certifications qui permettent de créer un premier référentiel, puis des labels permettant, quant à eux, d'anticiper les futures exigences. Par exemple, le label BBC 2005, proposé par Effinergie, a permis de tester les conditions d'application de la future RT 2012. Aujourd'hui, Effinergie propose un label BEPOS et un label Effinergie + qui adoptent une vision plus large de l'impact énergétique d'un bâtiment (effinergie, 2015).

Cette mise en place progressive n'a pourtant pas empêché plusieurs critiques émises à l'encontre de la RT 2012 comme la non présence d'un critère sur les émissions de CO₂, la non prise en compte de la gestion active de l'énergie et la prise en compte désavantageuse des pompes à chaleur et de la géothermie de faible profondeur dans le calcul du recours aux énergies renouvelables (Le Déaut et Déneux, 2013).

Cependant, au vu des difficultés économiques traversées par le secteur de la construction, des aménagements sont effectués pour permettre au secteur de s'adapter dans un délai plus long. Par exemple, une période transitoire pour la RT 2012 avait été mise en place pour les logements collectifs leur permettant de déroger à l'objectif de consommation maximale de 50 kWh_{EP}/m²/an pour celui de 57 kWh_{EP}/m²/an et ce jusqu'au 1^{er} Janvier 2015 ; cette période de transition a été étendue jusqu'au 1^{er} Janvier 2018 (MLETR, 2014).

1.1.3 Définition et calcul de la performance énergétique du bâtiment neuf

Concrètement, la nouvelle réglementation thermique introduit de nouvelles obligations de performances :

- une exigence d'efficacité énergétique minimale du bâti : besoin bioclimatique Bbio inférieur au Bbio_{max} dont la valeur est modulée en fonction de la localisation géographique, l'altitude, le type d'usage du bâtiment et pour les maisons individuelles, la surface habitable ;
- une exigence de consommation de référence Cep sur les cinq usages réglementaires qui doit être inférieure au Cep_{max}, d'une valeur de 50 kWh_{EP}/(m².an) modulée en fonction de l'altitude et de huit zones climatiques qui découpent le territoire français ;
- une exigence de confort d'été : Tic, la température la plus chaude atteinte dans les locaux au cours d'une séquence de cinq jours très chauds ne doit pas dépasser une valeur maximale Tic_{ref}.

Certaines exigences de moyens de la précédente réglementation sont également maintenues : traitement des ponts thermiques, de l'étanchéité de l'air, surface minimale de baies vitrées (1/6 de la surface habitable), généralisation de l'usage des énergies renouvelables, information de l'occupant.

L'ensemble de ces exigences définissent la performance énergétique du bâtiment (MEDDE, 2011).

Concernant le Cep, cette exigence est exprimée en kilowattheure d'énergie primaire. Cette dernière est de l'énergie brute i.e. juste après extraction et pas encore transformée (combustibles fossiles, bois, soleil, etc.). L'utilisation énergie primaire permet de prendre en compte les pertes lors de la production et de l'acheminement. Le coefficient de conversion des énergies

finale en énergies primaires a été fixé comme suit dans la réglementation dès 2005 : 2,58 pour l'électricité et 1 pour les autres énergies. Comme nous le verrons par la suite, ces coefficients conventionnels ne font pas l'unanimité.

Pour pallier le caractère normatif et non mesurable de l'énergie primaire, certaines recherches s'intéressent à la conception de systèmes basés sur une approche exergétique (Schmidt et Ala-Juusela, 2004). L'exergie est une grandeur qui permet de mesurer la qualité d'une énergie ; elle représente la quantité maximale (théorique) de travail mécanique qui peut être obtenue à partir d'une forme d'énergie donnée.

Nous ne nous sommes pas intéressés à cette forme de comptabilisation énergétique car elle reste encore trop éloignée de la pratique des concepteurs de bâtiment.

Avec la RT 2012, la phase de conception via l'application du calcul réglementaire devient centrale puisqu'elle conditionne la mise en construction (Merheb, 2013). Cette méthode de calcul nommée Th BCE 2012 est basée sur des scénarios conventionnels pour la présence d'occupants, les données météorologiques, etc. ainsi que sur des données spécifiques au bâtiment et vérifiables lors de la construction (surface, orientation, équipements, etc.). Les résultats obtenus sont utilisés pour valider le respect des exigences réglementaires et n'ont pas pour but de prédire les futures consommations du bâtiment. En effet, les scénarios de la méthode réglementaire sont moyennés pour comparer différents projets et ne prennent donc pas compte des spécificités et l'utilisation réelle du bâtiment. Le moteur de calcul élaboré par le CSTB à partir de la méthode Th BCE 2012 est intégré dans différents logiciels de simulation énergétique dynamique (SED) (MEDDE, 2011). Ces derniers peuvent également être utilisés pour simuler le comportement du bâtiment sous d'autres scénarios que ceux de la méthode Th BCE. Ils sont utilisés pour la conception et peuvent également apporter des indications sur les usages non pris en compte par la réglementation : usages immobiliers non réglementés (éclairage et ventilation des parkings, ascenseurs, etc.) et les usages mobiliers de l'énergie (électroménager, cuisson, bureautique, etc.) (ADEME, 2014).

Par ailleurs, il faut noter que la performance énergétique n'est pas une notion qui s'applique uniquement aux bâtiments neufs. En effet, pour les bâtiments existants, il existe également une réglementation :

- Pour les rénovations lourdes (bâtiments achevés après 1948 et rénovation de plus de 1000 m²), un objectif de performance est défini pour le bâtiment rénové dans son ensemble ;
- Pour les autres cas de rénovation, la réglementation définit une performance minimale pour l'élément remplacé ou ajouté Décret n°2007-363 du 19 mars 2007.

Ce dernier cas est basé sur la RT dite par élément et pour certains matériaux et produits de construction elle se traduit par une performance énergétique minimale (un seuil sur la résistance thermique ou le coefficient de transmission thermique) Arrêté du 3 mai 2007. Ainsi, il existe une certification, ACERMI, pour garantir les performances des isolants.

En outre, il existe aujourd'hui des garanties contractuelles sur la performance énergétique :

- La garantie de performance énergétique contractuelle (GPE) inclut l'exploitation et l'usage, se décline sur la durée et est fondée sur des consommations mesurées (sur un périmètre éventuellement plus large que les cinq usages de la RT 2012) ;

- La garantie de performance énergétique intrinsèque (GPEI) qui ne prend en compte que les cinq usages de la réglementation, la période de garantie s'achève un an après la réception et est réalisé grâce à un logiciel de SED (Huet *et al.*, 2013).

A l'avenir, il y aura donc des mesures opposables aux résultats des calculs effectués en conception.

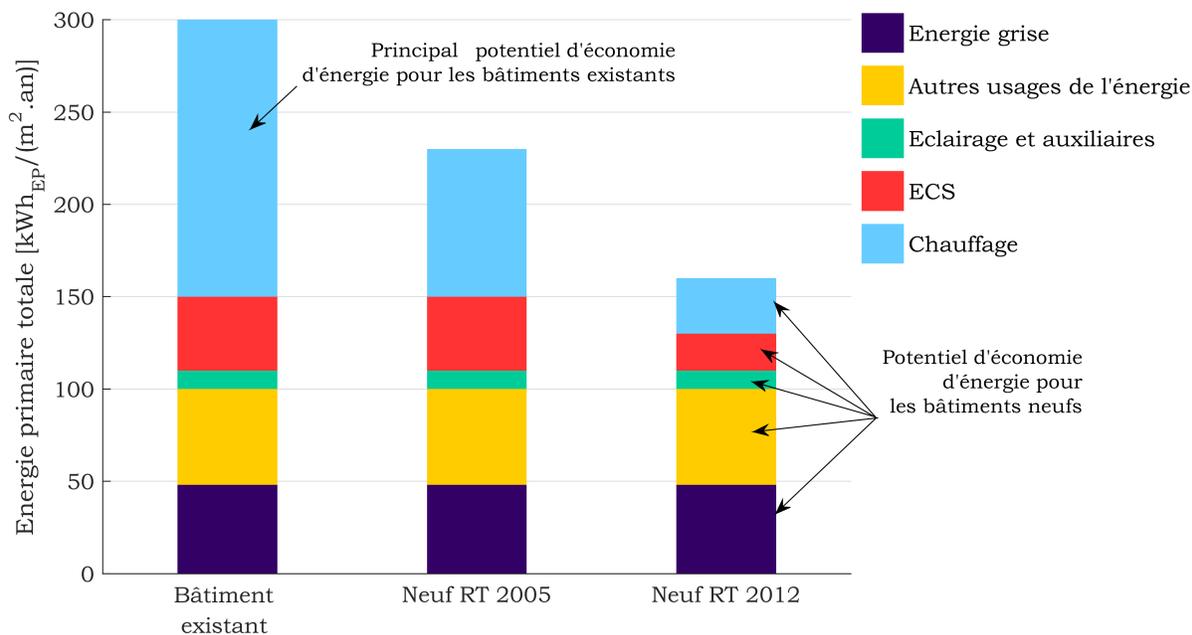


FIGURE 1.3 – Potentiel d’amélioration de la performance énergétique pour trois types de bâtiments : existant, RT 2005 et RT 2012 (Valeurs pour un logement typique)

Par ailleurs, le potentiel d’amélioration de la performance énergétique des bâtiments se restreint. En effet, comme l’illustre la figure 1.3, pour un bâtiment existant, l’amélioration de la performance énergétique passait par la réduction des consommations du chauffage. Cependant, pour un bâtiment RT 2012, où les consommations de chauffage et d’ECS ont déjà été réduites, la marge de manœuvre paraît réduite sur les cinq usages réglementaires actuels et le périmètre devra être étendu pour inclure les autres usages de l’énergie et l’énergie grise des matériaux.

Pour résumer, en France, la performance énergétique des bâtiments neufs est aujourd’hui basée sur la simulation énergétique dynamique lors de la conception. Pour l’évaluation, cette performance est définie par une réglementation, la RT 2012, considérée comme l’une des plus poussées en Europe comme le montre Young (2014) lorsqu’elle compare les réglementations énergétiques des bâtiments de quinze pays différents.

1.2 La performance environnementale des bâtiments

1.2.1 Contexte général

Outre sa forte consommation d'énergie et donc de ressources (principalement fossiles), le secteur du bâtiment n'est pas en reste en ce qui concerne d'autres impacts sur l'environnement.

La figure 1.4 présente l'évolution de la part des émissions de dioxyde de carbone (CO_2) pour différents secteurs d'activités entre 1990 et 2013 en France. Le résidentiel et le tertiaire sont aujourd'hui responsables de 24 % des émissions de CO_2 et même si ces émissions ont légèrement diminué depuis 2005, le secteur du bâtiment reste l'un des principaux émetteurs derrière le transport et devant l'industrie (CITEPA, 2014).

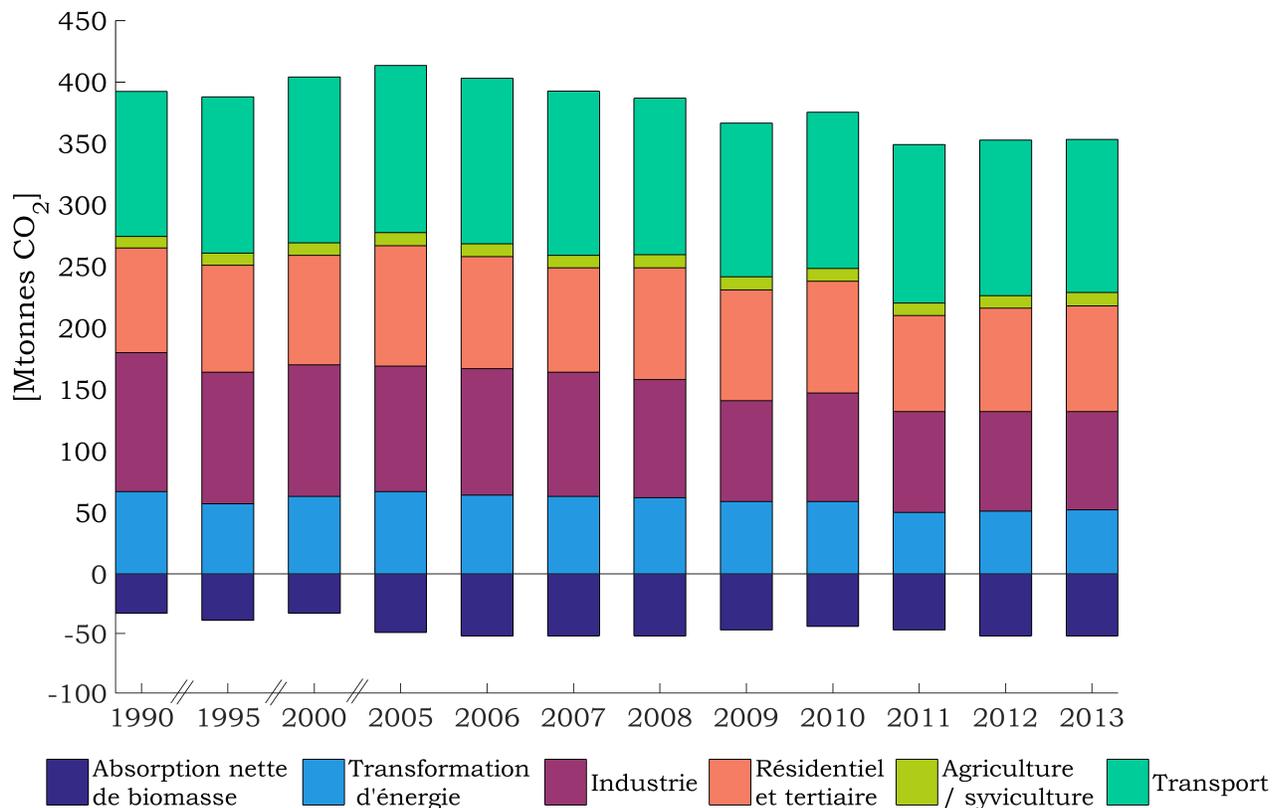


FIGURE 1.4 – Évolution des émissions de CO_2 dans l'air en France métropolitaine selon les différents secteurs d'activité (CITEPA, 2014)

En 2012 en France, le secteur du bâtiment émet 11 % du dioxyde de soufre (SO_2) (substance acidifiante), juste derrière le secteur de la transformation d'énergie (40 %) et l'industrie (45 %). Il est également le premier émetteur de Composés Organiques Volatiles Non Méthaniques (substances cancérigènes ou irritantes pour les voies respiratoires et responsables des phénomènes de smog) (ADEME, 2013). Par ailleurs, les bâtiments sont également la source d'une grande quantité de déchets, de l'ordre de 38 millions de tonnes par an en 2008 (FFB et ADEME, 2013) dont :

- 11,6 % sont des déchets inertes, valorisés à hauteur d'environ 50 % ;
- 75,3 % sont des déchets non dangereux dont 10 % sont valorisés ;
- 22,5 % sont des déchets dangereux dont le taux de recyclage est de 34,4 % (Bru, 2010).

De plus, tous ces impacts sont échelonnés sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment :

- La construction : extraction et fabrication des matériaux de construction ;
- L'utilisation : consommation d'énergie, d'eau, maintenance et remplacement ;
- La déconstruction et la fin de vie des produits et matériaux.

Pour quantifier ces impacts, il existe différents outils qui permettent d'évaluer la qualité environnementale du secteur du bâtiment.

Un premier exemple est la méthode Bilan Carbone[®] (ADEME, 2010). Elle est mono-critère (elle ne s'intéresse qu'aux émissions de GES). Bien qu'elle considère le bâtiment sur tout son cycle de vie, elle ne permet donc pas de prendre en compte les transferts d'impacts. Par exemple, le choix d'utiliser du bois énergie à la place de combustibles fossiles va réduire les émissions de GES mais augmenter les émissions de particules et la pollution de l'air.

D'autres exemples d'outils évaluant la qualité environnementale du bâtiment sont les diverses certifications environnementales volontaires existants en France et à l'étranger. Nous pouvons citer BREEAM au Royaume-Uni, LEED aux Etats-Unis, DGNB en Allemagne et HQE en France. Elles basent leurs notations sur des exigences de moyens comme sur des critères descriptifs et des exigences performantielles. Dans les référentiels BREEAM, LEED ou DGNB, l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est utilisée pour obtenir une approche quantitative via des seuils de performances environnementales à respecter pour les matériaux

Par ailleurs, deux normes européennes existent sur la performance environnementale des produits et matériaux de construction EN 15804 (2012a) et sur la performance environnementale des ouvrages EN 15 978 (2012b) et sont également basées sur l'ACV.

En France, depuis 2004, la norme NF P01-010 encadrait la production de déclarations environnementales des produits de construction, réalisée avec l'ACV. Les déclarations ainsi obtenues sont appelées Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) et sont regroupées sur la base de données INIES (www.base-inies.fr).

De plus, depuis juillet 2013, si un fabricant veut communiquer sur la performance environnementale de son produit, il est obligé d'utiliser l'ACV pour la déclaration environnementale (Article 228 de la loi Grenelle 2 2010) et ce sera également le cas à partir de juillet 2017 pour les équipements électriques, électroniques et de génie climatique.

A l'échelle du bâtiment, il n'existe pas encore d'obligation en terme de déclaration environnementale.

Aujourd'hui, le développement durable et la réduction des impacts sur l'environnement sont au cœur des préoccupations politiques avec par exemple les lois Grenelle ou encore les engagements inscrits dans la loi POPE : division par quatre, par rapport au niveau de 1990, des émissions nationales de GES d'ici 2050 (MEDDE, 2013).

Par ailleurs, l'absence de critères sur le Changement Climatique est aujourd'hui une des critiques de l'actuelle réglementation thermique (Le Déaut et Déneux, 2013).

Ainsi, une étiquette environnementale est en cours d'élaboration et préfigure une future réglementation pour des bâtiments responsables (RBR) incluant des indicateurs environnementaux et prenant en compte le cycle de vie complet du bâtiment (Boyer et Cleret, 2014).

Elle sera basée sur les résultats de précédents travaux comme ceux du groupe Common Metrics de SB Alliance (Hans *et al.*, 2013), HQE Performance (Lebert *et al.*, 2013), ou le projet EeBGuide (2012).

Comme nous l'avons vu, aujourd'hui, nous appréhendons la performance environnementale des bâtiments au travers du prisme de l'ACV. Dans le paragraphe suivant, nous présenterons les principes généraux de l'ACV puis son application aux bâtiments.

1.2.2 L'ACV de bâtiments dans la pratique

1.2.2.1 Concept général de l'ACV

L'ACV est une méthode d'analyse systémique multi-critères qui permet d'évaluer la performance environnementale d'un produit, d'un bien ou d'un service (Guinée, 2001). Elle est utilisée depuis plusieurs années dans différents secteurs (Hunt et Franklin, 1996) et fait l'objet de différentes normes : ISO 14 040 (2006b) et ISO 14044 (2006a).

Selon ces dernières, une ACV comprend quatre phases, comme définies sur la figure 1.5 ; l'ACV étant une approche itérative chaque phase peut entraîner une modification des précédentes. Par exemple, suite à l'interprétation des résultats on peut choisir de redéfinir les objectifs de l'étude.

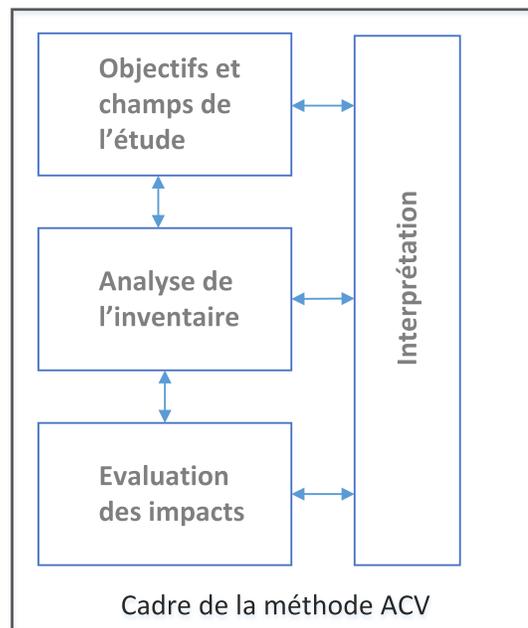


FIGURE 1.5 – Cadre méthodologique d'une analyse de cycle de vie (ISO, 2006b)

Dans la première phase, l'unité fonctionnelle est définie. Cette unité est utilisée comme référence pour la comparaison et les éléments sont comparés avec la même fonction (quantité, qualité et durée). Les critères environnementaux retenus pour l'analyse sont également identifiés dans la première phase.

Dans la phase d'inventaire, le système est modélisé en effectuant un bilan des flux de matières, d'énergies, d'émissions et de déchets pour chaque procédé inclus dans l'étude.

La phase d'évaluation des impacts permet de calculer les impacts environnementaux en regroupant les flux d'inventaire par catégories d'impacts et en les pondérant par des coefficients appelés facteurs de caractérisation.

La phase d'interprétation permet d'analyser et de discuter les résultats ainsi que d'expliquer les limites de la modélisation. Elle peut être effectuée à chaque étape et comme l'ACV est une approche itérative, on peut être amené à redéfinir les objectifs ou changer la modélisation suite à cette phase.

Deux types d'approches peuvent être distinguées :

- l'ACV attributionnelle qui évalue les impacts d'un produit ;
- l'ACV conséquentielle qui évalue l'impact d'une décision et des changements.

Dans le secteur du bâtiment, on utilise aujourd'hui la première approche car elle est recommandée pour les déclarations environnementales produits et l'éco-conception (JRC, 2011a).

Par ailleurs, aujourd'hui, de nouvelles méthodes ou approches se développent avec pour lien la notion centrale de cycle de vie : ACV dynamique, EIOLCA (Environmental Input-Output Based LCA), CCV (Coût du Cycle de Vie), ACV sociale, etc. Ces nouveaux développements visent à combler les lacunes et limitations actuelles de l'ACV (Finnveden *et al.*, 2009).

Plus particulièrement, l'utilisation du terme dynamique recouvre différentes études portant sur l'intégration de considérations temporelles dans la modélisation des systèmes étudiés ou dans l'intégration de spécificités temporelles dans la modélisation des impacts environnementaux (Beloin-Saint-Pierre, 2012).

1.2.2.2 L'ACV dans le secteur de la construction

1.2.2.2.1 La pratique : comment fait-on une ACV bâtiment ?

Le bâtiment est un système complexe qui nécessite un nombre important de données pour sa modélisation. Tout d'abord, on s'attachera à décrire le plus précisément possible sa typologie et son utilisation, son emplacement géographique, la durée de vie estimée du bâtiment, la durée d'étude, etc.

L'intérêt des normes EN 15084 et EN 15978 réside dans le lien effectué entre l'évaluation environnementale à l'échelle produit et l'évaluation à l'échelle bâtiment. Elles définissent des frontières communes (cf. Figure 1.6) entre les deux échelles, et permettent l'utilisation des déclarations environnementales produits comme base de l'évaluation à l'échelle bâtiment. La base de données INIES, qui regroupe les FDES, est donc une des bases de données utilisées en France pour l'ACV de bâtiment. Les quantités de matériaux sont calculées à partir des plans d'étude, tandis que le calcul des quantités d'énergie et eau utilisées en phase exploitation sont issues de scénarios. La mise en œuvre et la déconstruction sont également prises en compte via des scénarios.

Pour l'énergie, dans la pratique, on peut utiliser les scénarios réglementaires de la RT 2012 ou des données issues de SED.

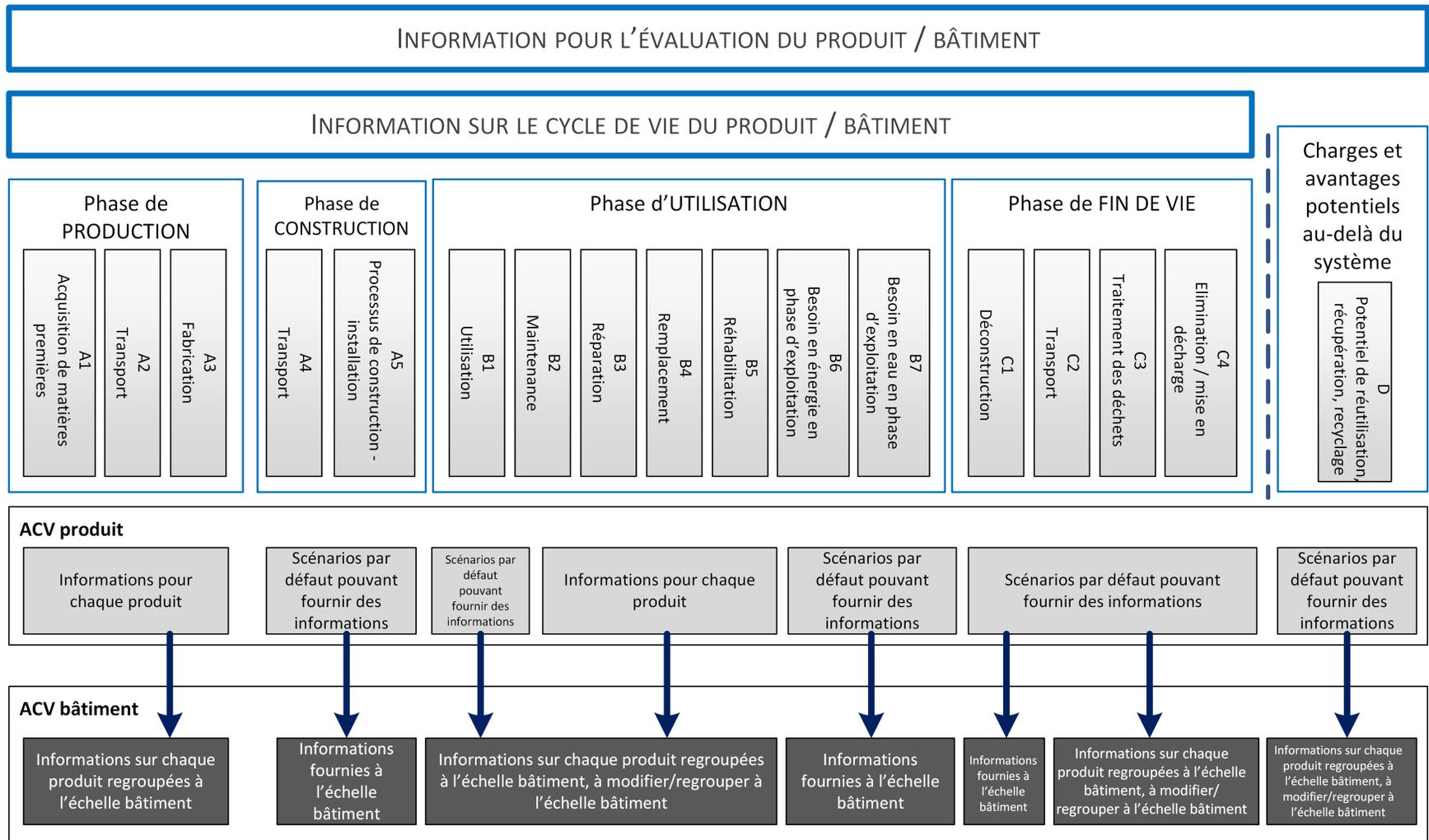


FIGURE 1.6 – Différentes phases du cycle de vie d'un produit de construction (selon EN 15804) ou d'un bâtiment (selon EN 15978) et lien entre les deux approches (EeBGuide, 2012)

Les indicateurs environnementaux demandés dans les normes européennes sont les mêmes à l'échelle produit qu'à l'échelle bâtiment et sont présentés dans le tableau 1.1.

Dans la suite de cette thèse, nous concentrerons notre analyse sur les indicateurs suivants :

- Changement Climatique
- Acidification (des sols et de l'eau)
- Utilisation nette d'eau douce
- Épuisements des ressources abiotiques - Éléments
- Épuisements des ressources abiotiques - Combustibles fossiles (si non disponible remplacé par Utilisation totale de l'énergie primaire non renouvelable)
- Déchets dangereux
- Déchets non dangereux
- Déchets radioactifs

Ces indicateurs ont été sélectionnés car ils ont été définis comme prioritaires par les lois Grenelle (2009; 2010) et pour les impacts environnementaux, car leurs calculs sont robustes et recommandés par le ILCD Handbook (JRC, 2011b). Les autres indicateurs, quand ils peuvent être calculés, sont présentés en annexes.

TABLE 1.1 – Indicateurs environnementaux des normes EN 15804 (2012a) et EN 15978 (2012b)

Catégorie	Indicateurs	Unité
Impacts environnementaux	Changement climatique	kg éq. CO ₂
	Appauvrissement de la couche d’ozone	kg éq. CFC-11
	Acidification des sols et de l’eau	kg éq. SO ₂
	Eutrophisation	kg éq. PO ₄ ³⁻
	Formation d’ozone photochimique	kg éq. C ₂ H ₄
	Épuisements des ressources abiotiques - Éléments	kg éq. Sb
	Épuisements des ressources abiotiques - Combustibles fossiles	MJ
	Pollution de l’eau	m ³ (d’eau)
	Pollution de l’air	m ³ (d’air)
Consommation des ressources	Utilisation de l’énergie primaire renouvelable à l’exclusion de celle utilisée en tant que matière première	MJ
	Utilisation de l’énergie primaire renouvelable en tant que matière première	MJ
	Utilisation totale de l’énergie primaire renouvelable	MJ
	Utilisation de l’énergie primaire non renouvelable à l’exclusion de celle utilisée en tant que matière première	MJ
	Utilisation de l’énergie primaire non renouvelable en tant que matière première	MJ
	Utilisation totale de l’énergie primaire non renouvelable	MJ
	Utilisation de matière secondaire	kg
	Utilisation de combustibles secondaires renouvelables	MJ
	Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables	MJ
	Utilisation nette d’eau douce	m ³
Déchets	Déchets éliminés dangereux	kg
	Déchets éliminés non dangereux	kg
	Déchets éliminés radioactifs	kg
Flux sortants	Composants destinés à la réutilisation	kg
	Matériaux destinés au recyclage	kg
	Matériaux destinés à la récupération d’énergie	kg
	Énergie fournie à l’extérieur	MJ

Concernant la méthode de calcul pour l'ACV bâtiment, elle se base sur une approche matricielle. La valeur de chaque indicateur est calculée pour chaque module (A1 à A5, B1 à B7, C1 à C4, D) des phases du cycle de vie en multipliant chaque quantité de produit ou service utilisé par la valeur unitaire de l'indicateur environnemental concerné, comme indiqué par l'équation 1.1.

$$Ind_i = \vec{a}_i \times \mathbf{M} \quad (1.1)$$

Ind_i est la valeur de l'indicateur environnemental pour le module i du bâtiment, \vec{a}_i est le vecteur contenant les quantités de tous les produits et services utilisés dans le module i du bâtiment, enfin \mathbf{M} est la matrice constituée des valeurs de l'indicateur environnemental par unité de tous les produits et services utilisés dans le module i du bâtiment.

Pour simplifier la saisie et le calcul des impacts des différentes phases de la vie d'un bâtiment, une approche par contributeur peut être utilisée comme c'est le cas dans le logiciel d'ACV développé par le CSTB, ELODIE (cf. Figure 1.7). Dans la suite de ce manuscrit, nous concentrons notre analyse sur le contributeur énergie (module B6).

	Phase de PRODUCTION	Phase de CONSTRUCTION	Phase d'UTILISATION	Phase de FIN DE VIE
Matériaux, Produits et Equipements	Acquisition matières premières, Transport, Fabrication	Transport, Processus de construction - installation	Utilisation, Maintenance, Réparation, Remplacement, Réhabilitation	Déconstruction, Transport, Traitement, Elimination
Consommation d'énergie			Conso d'énergie usages RT (B6) Conso d'énergie usages spécifiques de l'électricité (B6)	
Consommation d'eau et rejets liquides			Conso d'eau et rejets liquides (B7)	
Chantier		Chantier de construction (A5)		Chantier de déconstruction (C1)
Production de déchets d'activités			Production de déchets d'activités	
Transport des usagers			Transport des usagers	

FIGURE 1.7 – Liens entre l'approche par contributeur et les phases du cycle de vie d'un bâtiment dans le logiciel ELODIE

1.2.2.2.2 L'utilisation : quels acteurs réalisent des ACV de bâtiments ?

A l'heure actuelle, l'utilisation de l'ACV comme évaluation de la performance environnementale des bâtiments n'est pas obligatoire.

Au niveau mondial, il existe aujourd'hui différents logiciels d'ACV bâtiments parmi lesquels on peut citer ATHENA, BEES ELODIE, nova-EQUER, IMPACT ou GaBi Build-it . Comme nous le verrons dans les chapitres suivants, même si le principe de calcul est semblable, les bases de données utilisées et les méthodologies varient selon les logiciels (Lasvaux, 2010).

Il existe de multiples études d'ACV bâtiments, comme le montrent Khasreen *et al.* (2009) qui ont analysé une trentaine d'ACV bâtiments réalisées en Europe et aux États-Unis au cours des vingt dernières années. Les auteurs soulignent le travail des chercheurs pour promouvoir l'ACV en tant qu'outil d'aide à la décision en phase de conception. Cependant, ils notent également qu'il reste des obstacles à surmonter pour une utilisation généralisée de l'ACV dans le secteur du bâtiment. Notamment, ils mettent en avant que de part la spécificité des bâtiments qui présente des durées de vie et d'étude longues, les hypothèses nécessaires pour modéliser la vie en œuvre et la fin de vie ont besoin d'être testées et acceptées par la communauté.

En outre, la future réglementation ne peut imposer un calcul environnemental sans avoir des exigences sur les résultats (approche performantielle) et des seuils doivent donc être définis. Des valeurs de référence pour les différents contributeurs sur l'ensemble des indicateurs doivent donc être connues.

Aujourd'hui, de plus en plus de labels exigent la réalisation d'analyses de cycle de vie et d'analyses coût du cycle de vie (CCV) et ont déjà défini des seuils de performance. Par exemple, la certification allemande DGNB a défini des valeurs limites, de références et cibles pour chaque indicateur d'ACV et de CCV (König et De Cristofaro, 2012).

De plus, en France, le projet HQE Performance (2010-2013) est également allé dans cette direction ; il a permis de déterminer des valeurs de référence en se basant sur l'analyse statistique de 140 ACV de bâtiments. Son but était avant tout de proposer et de tester un cadre de référence pour l'évaluation quantitative des bâtiments auprès d'acteurs du secteur du bâtiment : certificateurs, bureaux d'étude, etc. Comme présentés sur la figure 1.8, les résultats soulignent la contribution importante des produits de construction et des équipements à l'impact sur le changement climatique et à l'indicateur d'énergie non renouvelable (part dite "d'énergie grise"). La part des consommations d'énergie pendant la phase d'usage dans les impacts est également non négligeable, particulièrement pour l'énergie dite spécifique (i.e. ne correspondant pas aux usages réglementaires) (Lebert *et al.*, 2013).

Le groupe de travail international "Piloting Common Metrics" de SB Alliance a mené une analyse sur les contributeurs influents sur différents indicateurs grâce à des modélisations réalisées dans différents pays. Ils concluent que les matériaux et produits de construction ont une influence significative sur l'énergie non renouvelable et les émissions de GES et que l'énergie consommée en phase exploitation a, quant à elle, une influence très significative (Hans *et al.*, 2013).

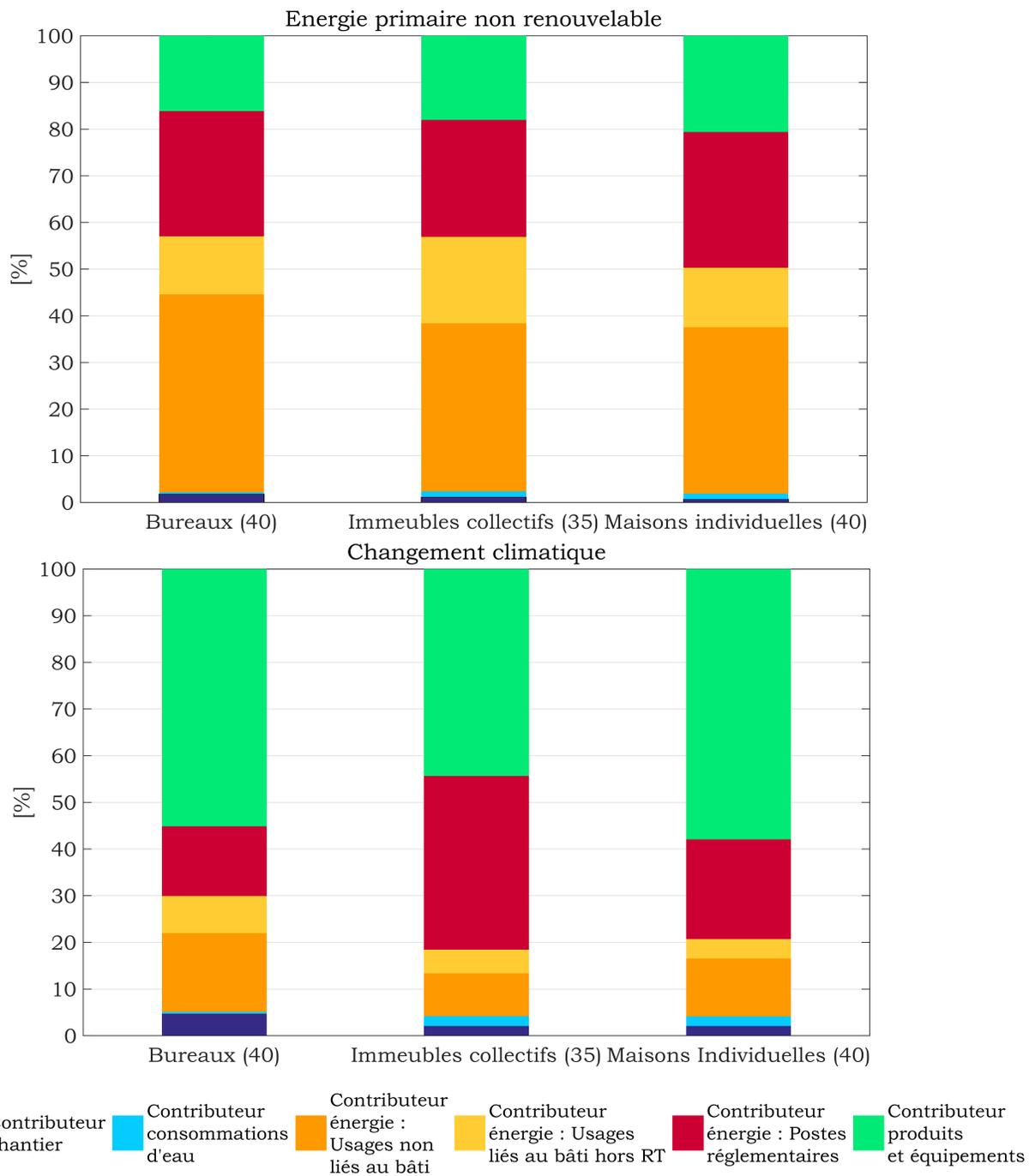


FIGURE 1.8 – Résultats du projet HQE Performance pour les indicateurs Énergie Primaire Non Renouvelable et Changement Climatique pour une durée d'étude de 50 ans

Ainsi, bien que l'évaluation environnementale des bâtiments ait été étudiée depuis de nombreuses années (Kohler et Lützkendorf, 2002) et que des cadres méthodologiques aient été construits via les normes européennes sur les produits et matériaux de construction et les bâtiments, il existe encore plusieurs méthodologies et aucune n'est plébiscitée largement par la communauté.

De plus, comme identifiées par (Ignacio Zabalza Bribián *et al.*, 2009), les difficultés à surmonter pour l'utilisation de l'ACV dans le secteur du bâtiment sont la complexité et le coût de cette analyse, le besoin d'uniformisation des résultats ainsi que le manque de lien avec les réglementations énergétiques et plus généralement le manque d'obligation réglementaire.

La gestion des incertitudes et la robustesse des résultats est un enjeu majeur en ACV comme présenté par (Reap *et al.*, 2008).

Pour résumer, les recherches dans le domaine de l'ACV bâtiment s'orientent autour de quatre directions :

1. la standardisation pour permettre de comparer les résultats et de générer l'utilisation de l'ACV ;
2. la simplification basée sur des modèles détaillés et validés ;
3. la différenciation pour construire des modèles plus détaillés pour répondre à des questions spécifiques ;
4. et l'intégration avec d'autres méthodes d'évaluation pour simplifier et assurer la consistance des données utilisées (Kohler, 2012).

De plus, la route est encore longue pour construire une approche obligatoire et performante comme c'est le cas pour l'évaluation énergétique. En effet, le projet HQE Performance a été un premier pas pour tester un cadre méthodologique sur l'ACV bâtiment auprès d'acteurs déjà sensibilisés à l'éco-conception. Ensuite, une certification est une première étape pour formaliser les exigences environnementales sur le bâtiment. Il permettra de mieux comprendre les paramètres influents sur certains indicateurs et d'étendre le panel de bâtiments testés. Un label pourra venir renforcer cette certification ; il servira de base à l'Etat pour la mise en place d'une future réglementation.

1.3 Vers des exigences de performances énergétiques et environnementales pour les bâtiments de demain ?

En 2020, via la réglementation pour des bâtiments responsables, l'évaluation énergétique (i.e. celle de la RT) et l'évaluation environnementale (via l'ACV et telle que définie par les normes européennes) ne feront probablement plus qu'une.

Or, avec l'ACV, l'énergie consommée en phase d'utilisation n'est plus seulement un indicateur mais un contributeur aux impacts environnementaux du bâtiment, au même titre que les produits et équipements, le chantier (de construction et déconstruction), les consommations d'eau pendant la vie en œuvre ou bien encore le déplacement des utilisateurs. Ainsi, un changement de paradigme est en cours car l'éco-conception des bâtiments n'est plus basée sur la seule réduction de la consommation d'énergie lors de la phase d'usage (développement de la performance environnementale des bâtiments notamment via les certifications).

Par ailleurs, l'évaluation énergétique et l'évaluation environnementale sont deux approches qui ont été développées en parallèle. En effet, l'évaluation énergétique a été mise en place pour réduire les consommations en exploitation d'un bâtiment car nous l'avons observé sur la figure 1.3, elles étaient le principal gisement d'amélioration. L'évaluation environnementale est plus globale et apparaît adaptée aux bâtiments neufs où les potentiels d'amélioration se situent aussi bien sur l'énergie consommée que sur l'énergie grise des matériaux. Cette divergence d'objectif se traduit par des postulats différents, comme nous allons le voir par la suite.

1.3.1 Points divergents entre évaluation énergétique et environnementale

La réglementation thermique, en diminuant l'énergie consommée, est une mesure propice à réduire, d'ici 2050, les émissions de GES par un facteur quatre par rapport au niveau de 1990. Cependant, en fixant des objectifs performanciers sur l'énergie, l'évolution de la consommation d'énergie est considérée comme linéaire par rapport à celle des émissions de GES. Ce n'est pas le cas, comme le montre Villot (2012), car toutes les énergies n'ont pas le même impact.

D'ailleurs, les détracteurs de la RT 2012 s'appuient sur cet argument car en ne prenant en compte que l'énergie primaire avec les coefficients présentés au paragraphe 1.1.3, la réglementation favoriserait l'utilisation de gaz par rapport à celle d'électricité (Bergougnoux, 2013). Or, le gaz a un bilan GES moins favorable que celui de l'électricité : 0.243 kg éq. CO₂/kWh PCI pour le gaz naturel et 0.082 kg éq. CO₂/kWh pour l'électricité (données issues de la Base Carbone (2015)).

Dans les paragraphes suivants, nous allons développer les différences entre évaluation énergétique et évaluation environnementale.

1.3.1.1 Les différences dans la comptabilisation de l'énergie

Une des premières différences entre l'évaluation énergétique et l'évaluation environnementale est la manière de comptabiliser l'énergie.

Suivant la frontière choisie, une énergie peut être comptabilisée de différentes manières comme le présente la figure 1.9. Les besoins d'un bâtiment sont généralement quantifiés en tant qu'*énergie utile*. Les systèmes ayant rarement des rendements de 100 %, des pertes sont à considérer pour quantifier *l'énergie finale* i.e. l'énergie comptabilisée au compteur. *L'énergie primaire*, quant à elle, représente en plus de l'énergie finale, l'énergie nécessaire à l'extraction et la transformation des ressources énergétiques brutes et à leurs acheminements.

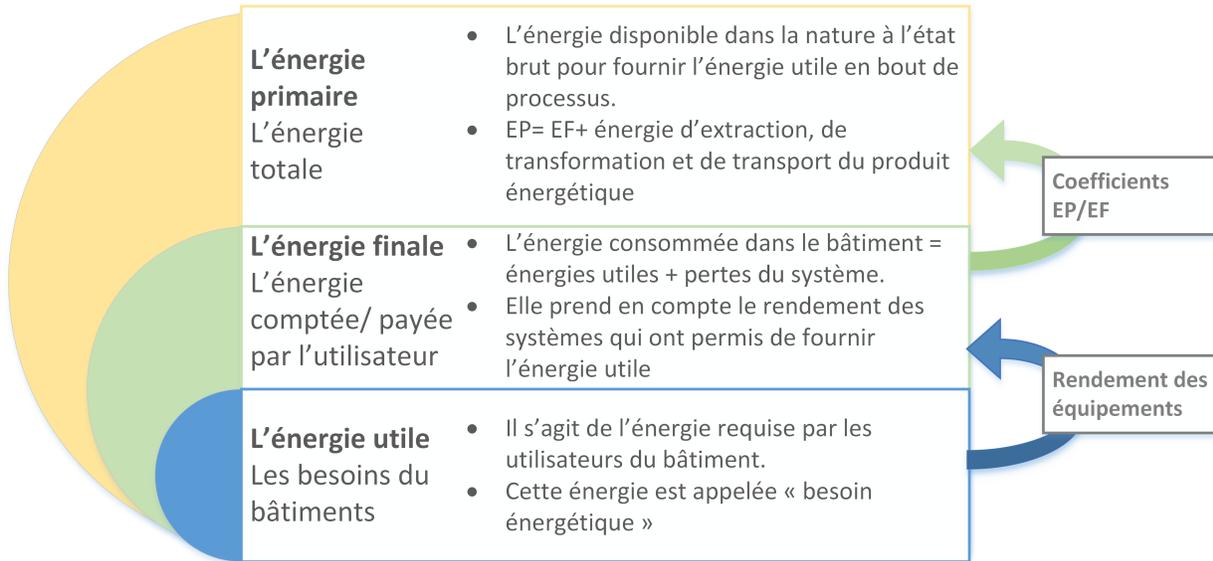


FIGURE 1.9 – Différences et conversions entre énergie primaire, finale et utile

Comme indiqué à la section 1.1.3, l'approche énergétique réglementaire utilise l'énergie primaire et utilise des coefficients de conversion entre énergie finale et énergie primaire figés. En ACV, les données collectées sur la consommation du bâtiment le sont en énergie finale puisque des données environnementales modélisant la chaîne de production de chacun des vecteurs énergétiques sont ensuite associées à ces données de consommation. Ces modélisations sont définies pour un contexte temporel et géographique donné i.e. électricité consommée en France en 2008. Chaque base de données propose un profil environnemental par source d'énergie. Cette modélisation de la chaîne de production et de distribution entraîne des différences avec les coefficients conventionnels utilisés dans la RT (cf. Figure 1.10).

Cette divergence est principalement due à la représentativité des données utilisées pour calculer les coefficients de conversion. Par ailleurs, les coefficients de la RT sont figés pour chaque vecteur énergétique, alors qu'en ACV, la modélisation de la chaîne de production permet de les adapter en fonction du contexte (Sidler, 2009b).

Ainsi, entre les deux approches, deux résultats différents seront obtenus pour la consommation en énergie primaire lors de la phase d'utilisation d'un même bâtiment. Il faut bien l'expliquer aux acteurs pour mettre en cohérence les deux résultats.

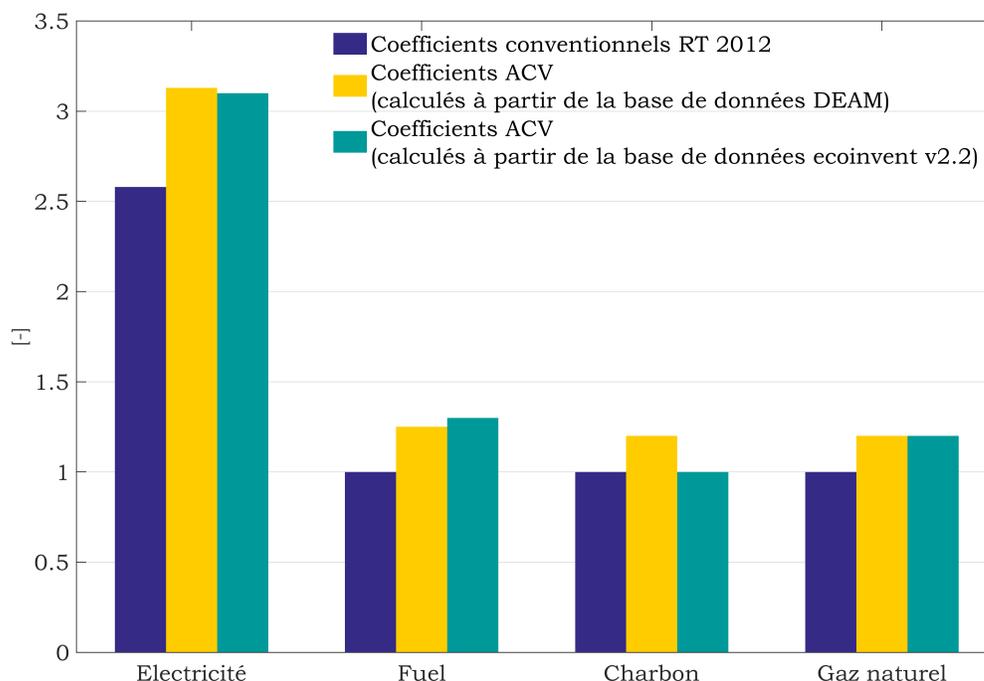


FIGURE 1.10 – Différences entre coefficients de conversion d’énergie finale à énergie primaire entre l’approche ACV et l’approche énergétique réglementaire pour des énergies consommées en France chez l’utilisateur final. Les inventaires du cycle de vie ont été réalisés à partir de données des années suivantes : électricité (2004 pour ecoinvent v2.2 et 2005 pour DEAM), fuel (2000 pour ecoinvent v2.2 et 2005 pour DEAM), charbon (1992-1998 pour ecoinvent v2.2 et 2005 pour DEAM) et gaz naturel (2000-2001 pour ecoinvent v2.2 et 2006 pour DEAM).

Par ailleurs, les frontières sont également différentes lorsque nous nous intéressons aux usages énergétiques pris en compte dans l’approche énergétique réglementaire et dans l’approche environnementale. En effet, aujourd’hui dans la première, les efforts sont concentrés sur le chauffage, le refroidissement, l’eau chaude sanitaire, la ventilation, l’éclairage et les auxiliaires de distribution. Or, si une approche holistique est souhaitée comme c’est le cas en ACV, les usages liés au bâti mais non réglementés comme les ascenseurs, l’éclairage et la ventilation des parkings, l’éclairage extérieur, etc. et les usages non liés au bâti (dits mobiliers, principalement usages spécifiques de l’électricité) doivent faire partie de l’analyse. Le choix des usages à considérer dépend de l’objectif de l’évaluation, cependant ne pas considérer l’ensemble des usages énergétiques ayant lieu sur la parcelle peut induire un biais dans l’évaluation. Notamment, la prise en compte d’usages non réglementés, en particulier mobiliers, pose certaines questions sur la cohérence entre les calculs thermiques, prenant en compte les apports de chaleur liés à ces usages, et l’ACV intégrant les impacts environnementaux liés aux consommations énergétiques et aux équipements correspondants.

1.3.1.2 Les différences dans les indicateurs énergétiques

Le tableau 1.1 présente les huit indicateurs utilisés en ACV en rapport avec l’énergie ; cependant, ces derniers ne comptabilisent ou n’incluent pas les mêmes sources d’énergies que

les indicateurs utilisés dans l'approche énergétique réglementaire.

En effet, dans l'approche réglementaire, l'énergie renouvelable produite sur la parcelle est déduite de la consommation totale en énergie primaire du bâtiment ; le Cep agrège donc les informations de production et de consommation.

Avec l'approche ACV, les frontières d'étude du système sont élargies : toutes les ressources énergétiques prélevées dans l'environnement pour toutes les phases du cycle de vie bâtiment sont considérées. De plus, les flux d'énergie d'origine renouvelable sont séparés de ceux d'origine non renouvelable, qu'ils soient produits ou non sur la parcelle et sont renseignés, respectivement, dans les indicateurs *Utilisation totale de l'énergie primaire renouvelable* et *Utilisation totale de l'énergie primaire non renouvelable*. L'indicateur *Énergie fournie à l'extérieur* permet de valoriser la quantité d'énergie produite sur la parcelle et qui n'est pas auto-consommée par le bâtiment.

Comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, il existe des différences dans les frontières, la manière de comptabiliser l'énergie et d'afficher les résultats entre l'approche énergétique et l'approche environnementale. Sans remettre en cause les postulats des deux approches, la thèse vise, en premier lieu, à faire le lien entre celles-ci. Autrement dit, nous cherchons à répondre à la question : quelles doivent être les caractéristiques du bilan énergétique pour son utilisation dans l'évaluation environnementale de l'énergie utilisée lors de la phase d'utilisation d'un bâtiment ?

Par ailleurs, une réglementation se doit d'accompagner les innovations, et non pas les freiner. Les paragraphes suivants présentent les problématiques soulevées par la prise en compte de futures technologies dans l'évaluation énergétique et environnementale.

1.3.2 Prise en compte de l'innovation

Non seulement les évaluations énergétique et environnementale doivent évoluer vers une vision commune, mais la future réglementation ne doit pas être obsolète vis à vis des innovations du secteur du bâtiment par exemple la généralisation des bâtiments (ou territoire) à énergie positive ou les technologies de maîtrise de la demande d'énergie.

Nous allons tout d'abord nous intéresser à la future évolution du bâtiment en terme de performance énergétique : le BEPOS et aux problématiques soulevées par leurs évaluations énergétique et environnementale. Aujourd'hui, il n'existe pas de définition consensuelle des BEPOS ; Shanthirabalan et Rochard (2014) ont recensé les définitions suivantes :

- Un BEPOS est un bâtiment qui respecte la RT 2012 et dont la production locale d'énergie compense les besoins énergétiques des cinq usages sur l'année ;
- Un BEPOS est un bâtiment dont le Cep est plus ambitieux que celui de la RT 2012 (c'est-à-dire $Cep \leq 0.9 \times Cep_{max}$) et dont la production locale d'énergie compense les besoins énergétiques des cinq usages sur l'année ;
- Un BEPOS est un bâtiment labellisé BEPOS-effinergie : son Cep et son Bbio sont plus ambitieux que ceux de la RT 2012 (20 % inférieurs) et dont la production locale d'énergie "compense" les besoins énergétiques des cinq usages et des autres usages de l'énergie sur l'année (compensation modulée par le nombre d'étage et la zone géographique) ;

- Un bâtiment passif (i.e. dont la consommation pour le chauffage est inférieure à 15 kWh_{EP}/(m².an) et à 120 kWh_{EP}/(m².an) tous usages confondus) dont la production locale couvre tous les usages énergétiques.

Ici, nous reprenons les deux dernières définitions sans prendre en compte les exigences sur le bâti (cela simplifie la sélection des cas d'études). Ainsi, dans la suite de ce document, un bâtiment est BEPOS dès lors qu'il produit plus d'énergie qu'il n'en consomme, tous usages confondus, en moyenne sur l'année.

Pour ces bâtiments BEPOS, l'ensemble des usages doit être considéré si l'on veut réaliser un bilan énergétique physiquement réaliste à ses frontières et ainsi déterminer les parts d'énergie importée, exportée et auto-consommée. Cette distinction est requise par la norme européenne sur la performance environnementale des bâtiments, même si cette dernière ne précise pas de méthode ou de pas de temps pour déterminer ces flux. Or, le pas de temps est déterminant car selon sa finesse, il permet d'observer la corrélation temporelle entre la consommation du bâtiment et la production d'énergie sur site (Voss *et al.*, 2012).

Par ailleurs, comme nous l'avons évoqué précédemment la notion de BEPOS sera étendue à celle d'un territoire. Ce changement d'échelle implique de réaliser un bilan énergétique qui prend en compte les éventuelles interactions entre bâtiments. En effet, lorsqu'un bâtiment produit de l'énergie, il faudra déterminer si d'autres bâtiments l'utilisent.

Nous retrouvons, ici, notre première problématique de recherche que l'on peut reformuler de la manière suivante : quelles sont les caractéristiques temporelles et spatiales à prendre en compte dans le bilan énergétique pour son utilisation dans l'évaluation environnementale des consommations d'énergie lors de la phase d'utilisation ?

En outre, en ACV, il existe différentes méthodes pour calculer les impacts environnementaux liés à la production locale d'énergie et cela peut entraîner des différences dans les résultats (Fouquet *et al.*, 2014).

Une nouvelle problématique de recherche émerge alors : comment doit-on exprimer les résultats liés à l'utilisation d'énergie ?

Par ailleurs, comme introduit à la section 1.1.1, les mécanismes de MDE vont continuer de se développer dans les années à venir et cela implique de mieux prendre en compte les interactions du bâtiment avec les réseaux. Assurément, entre le développement des énergies décentralisées et/ou intermittentes et la gestion des pointes de consommation via l'effacement (écrêtement de la courbe de charge d'un bâtiment pour limiter son appel de puissance lors d'une pointe) (Bouckaert, 2013), il devient crucial de comprendre quand et comment un bâtiment fait appel aux réseaux. En effet, la performance du bâtiment ne s'évalue plus intrinsèquement mais en prenant en compte ses interactions avec les réseaux et leurs potentiels impacts.

Prenons l'exemple de l'énergie électrique : pour répondre à une demande variable, les producteurs électriques français font appel à des centrales pouvant réagir rapidement aux appels de puissance comme les centrales au fioul, plus émettrices de GES (Marignac *et al.*, 2010). Ainsi, les impacts environnementaux de l'électricité sont aujourd'hui très variables dans le temps comme l'illustre la figure 1.11 pour l'année 2012. Cela signifie que même si la quantité d'énergie utilisée annuellement, les impacts environnementaux d'un bâtiment

peuvent donc être très différents en fonction des appels de puissance (timing et quantité appelée) considérés.

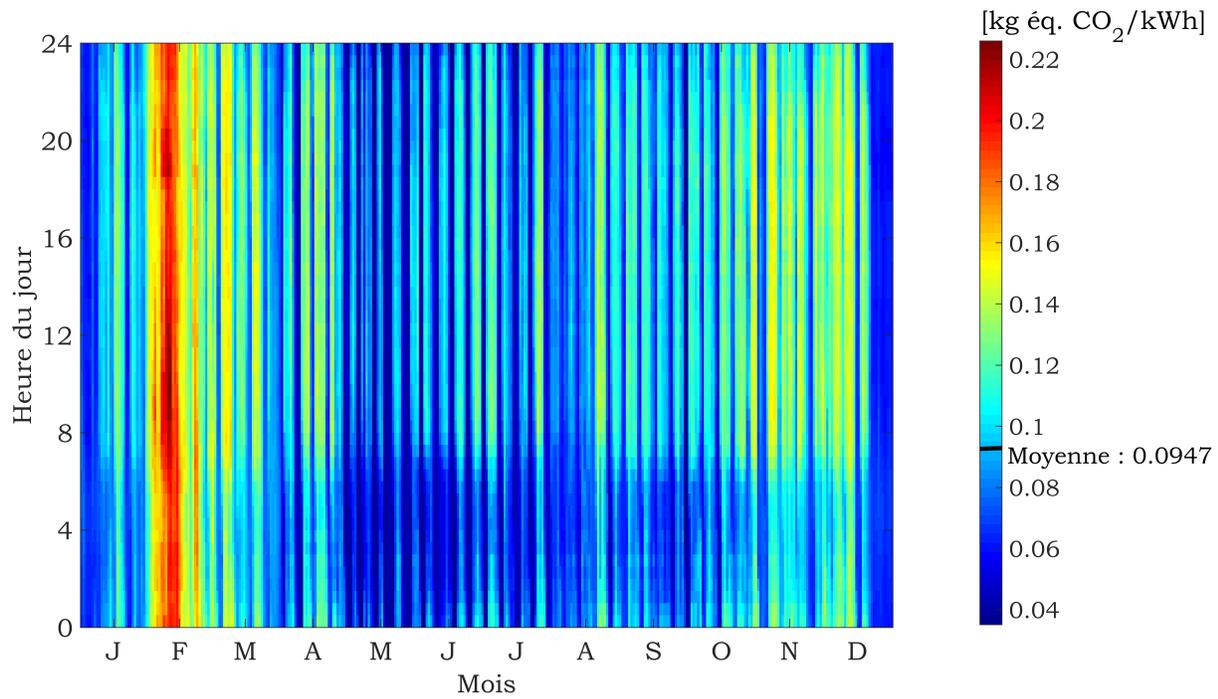


FIGURE 1.11 – Variations horaires et journalières des émissions de GES de la production électrique française en 2012

Ainsi, si nous reprenons l'équation 1.1 et que nous l'appliquons au cas particulier du contributeur énergie, elle devient :

$$\overrightarrow{\mathbf{I}_{\text{bâtE}}} = \sum_i C_{Ei} \times \overrightarrow{\mathbf{I}_{\text{Ei}}} \quad (1.2)$$

C_{Ei} est la consommation d'énergie de type i du bâtiment moyennée sur l'année.

$\overrightarrow{\mathbf{I}_{\text{Ei}}}$ est le vecteur des impacts environnementaux unitaire de l'énergie i et est issu de base de données d'ACV.

$\overrightarrow{\mathbf{I}_{\text{bâtE}}}$ est le vecteur des impacts environnementaux du contributeur énergie.

Dans le cas où il existe différentes sources de production pour l'énergie de type i , par exemple pour l'électricité qui peut être d'origine nucléaire, hydraulique, éolienne, etc., le calcul du vecteur $\overrightarrow{\mathbf{I}_{\text{Ei}}}$ peut être affiné de la manière suivante :

$$\overrightarrow{\mathbf{I}_{\text{Ei}}} = \overrightarrow{\mathbf{Mix}_i} \times \mathbf{FE}_i \quad (1.3)$$

$\overrightarrow{\mathbf{Mix}_i}$ est le vecteur représentant le mix des différentes sources de production utilisées pour obtenir l'énergie i . Il est, la plupart du temps, issu de statistiques énergétiques (comme celles de l'IAE (International Energy Agency, 2008)) et est représentatif d'un lieu géographique pour plusieurs années bien qu'extrapolé à partir d'une année spécifique (Jungbluth *et al.*, 2004).

\mathbf{FE}_i est la matrice des facteurs de caractérisation unitaires associés à chaque source de production, elle provient de base de données ACV.

Or, pour l'évaluation des technologies de MDE, nous avons vu que C_{Ei} devait être étudié non plus sur l'année mais en fonction du temps. En outre, comme nous l'avons également vu, les impacts environnementaux des énergies peuvent varier dans le temps (cf. figure 1.11). Cela interroge : tous les termes de l'équation 1.2 doivent-ils être étudiés en fonction du temps ?

Nous retrouvons notre première problématique : quelles doivent être les caractéristiques temporelles du bilan énergétique pour l'évaluation environnementale ? De plus, deux nouvelles questions émergent :

1. quelles données environnementales sur les vecteurs énergétiques doivent-elles être utilisées ? Avec quelles caractéristiques temporelles ?
2. quelle est l'influence de ce choix de données sur les résultats ?

Les différences de postulats entre les évaluations énergétiques et environnementales et la prise en compte des futurs développements technologiques dans le secteur du bâtiment (bâtiments producteurs d'énergie et MDE) montrent qu'il reste des problématiques à élucider pour la mise en place d'une réglementation énergétique et environnementale sur les bâtiments.

1.4 Conclusions et objectifs scientifiques de la thèse

Pour conclure, ce chapitre a permis de comprendre comment la performance énergétique des bâtiments était définie au niveau réglementaire en France et quelles en étaient les limites. Quant à la performance environnementale, un cadre européen définit son analyse mais les exigences performantielles sont en cours de construction. Les deux approches doivent converger mais présentent actuellement des divergences et des limites pour prendre en compte les futurs développements dans le secteur du bâtiment.

L'objectif de cette thèse est d'étudier la méthodologie d'analyse de cycle de vie bâtiment, en se focalisant sur le calcul des impacts environnementaux de la consommation d'énergie en phase exploitation : plus particulièrement, de déterminer les spécifications nouvelles à prendre en compte pour les bâtiments et les îlots de demain et à réinterroger les pratiques actuelles pour toutes les constructions.

Pour cela, nous avons identifié principalement trois problématiques à résoudre :

- Quelles sont les caractéristiques temporelles et spatiales à prendre en compte dans le bilan énergétique pour son utilisation dans l'évaluation environnementale des consommations d'énergie lors de la phase d'utilisation ?
- Quelles doivent être les caractéristiques temporelles des données environnementales utilisées avec le bilan énergétique ?
- Quelles sont les influences de choix méthodologiques comme la gestion de l'export d'énergie ou le choix d'une donnée environnementale sur les résultats ?

Le prochain chapitre présente une démarche de recherche visant à répondre à ces problématiques.

Chapitre 2

Méthodologie de recherche

Le chapitre précédent a montré que dans le secteur du bâtiment, les réglementations énergétiques successives ont principalement consisté à faire diminuer les consommations des usages dits réglementaires des bâtiments. De plus, l'évaluation environnementale, basée sur l'ACV, est en train de s'imposer pour déterminer les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Ainsi, l'évaluation de la performance du bâtiment s'élargit, d'une part à d'autres indicateurs que la seule consommation d'énergie, d'autre part à d'autres phases du cycle de vie que la seule vie en œuvre.

Les deux approches doivent converger, en particulier pour construire la future réglementation énergétique et environnementale sur les bâtiments. Par ailleurs, la généralisation des bâtiments à énergie positive et le développement des systèmes de gestion de la demande énergétique obligent à améliorer la modélisation des interactions du bâtiment avec les équipements de proximité et les réseaux.

Les trois problématiques de recherche identifiées dans le chapitre précédent concernent la modélisation de l'impact environnemental du contributeur énergie et sont les suivantes :

- les caractéristiques temporelles et spatiales du bilan énergétique utilisé pour le calcul des impacts environnementaux du contributeur énergie ;
- les caractéristiques temporelles des données environnementales associées à ce bilan ;
- l'influence des choix méthodologiques et de données environnementales sur les résultats.

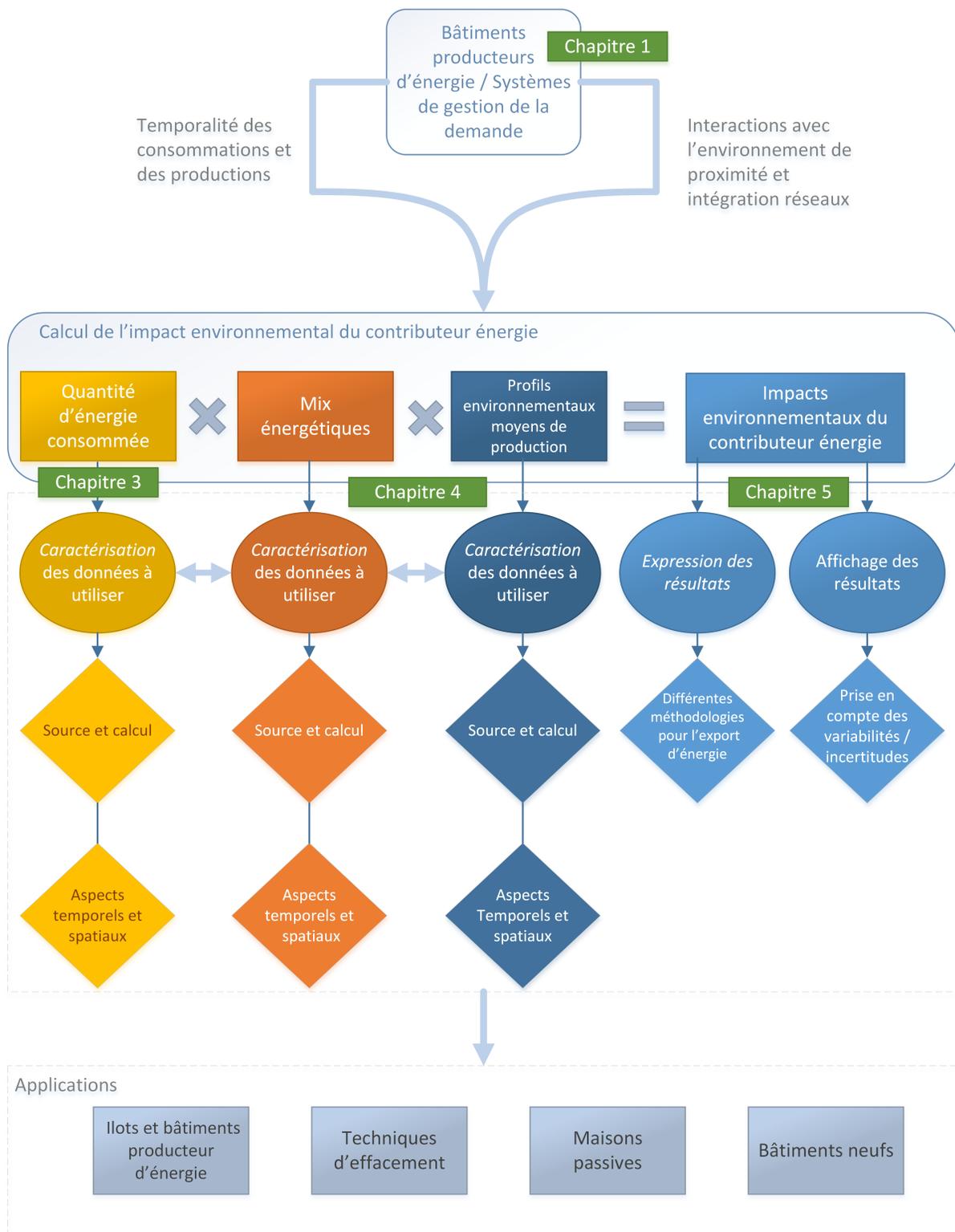


FIGURE 2.1 – Démarche de la thèse

La figure 2.1 synthétise la démarche de recherche employée pour répondre à ces problématiques.

Nous y trouvons une représentation schématique du calcul de l'impact environnemental du contributeur énergie.

La démarche consiste donc à étudier chaque terme de cette équation : la quantité d'énergie consommée, les mix énergétiques, les profils environnementaux de chacun des moyens de production et les impacts environnementaux. Plus particulièrement, les changements nécessaires à l'intégration des nouvelles problématiques se font via une nouvelle caractérisation des données d'entrées (frontières et qualité). Pour chacune de ces données, les sources et l'éventuel calcul nécessaire à leur exploitation sont explicités ainsi que les aspects temporels et spatiaux à prendre en considération. Pour les données de sorties, nous étudions l'influence des méthodologies de gestion de l'export d'énergie sur les résultats ainsi que la sensibilité à la variabilité des données environnementales. Pour valider les spécifications requises sur les données, nous utilisons différents cas d'études représentatifs des nouvelles problématiques. Bien entendu, même si chaque terme est traité séparément, nous nous attacherons à préciser les liens qui les unissent.

Le plan de ce manuscrit suit la démarche adoptée.

Dans le prochain chapitre, nous nous intéresserons à la quantité d'énergie consommée par le bâtiment. Plus particulièrement, nous verrons comment le bilan énergétique doit être adapté à l'échelle de l'îlot et pour les bâtiments producteur d'énergie.

Le quatrième chapitre s'intéresse aux mix énergétiques et aux profils environnementaux des moyens de production. Nous nous attacherons à définir les énergies utilisées dans les bâtiments ainsi que leurs variations temporelles à court et moyen terme.

Le cinquième chapitre traite des résultats i.e. des impacts environnementaux de l'utilisation d'énergie lors de la vie en œuvre mais également du bilan environnemental global du bâtiment. Nous étudierons la sensibilité des résultats à la variabilité des profils environnementaux des moyens de production des mix énergétiques et l'influence des méthodologies de gestion de l'export d'énergie sur les résultats d'ACV bâtiments.

Chapitre 3

Bilan énergétique pour l'ACV bâtiment

Comme nous l'avons vu précédemment, le calcul des impacts environnementaux du contributeur énergie se base sur des résultats de SED ou de calcul réglementaire. Ces consommations d'énergie du bâtiment sont exprimées en énergie primaire et doivent être transformées en énergie finale pour leur utilisation en ACV.

Cependant, nous avons également montré que pour les bâtiments producteurs d'énergie et pour les mécanismes de MDE, il y a une limite à utiliser des consommations annuelles d'énergie, comme c'est le cas aujourd'hui.

Par ailleurs, l'extension de la performance énergétique et environnementale à une autre échelle que le bâtiment interroge sur les données à utiliser pour prendre en compte les interactions énergétiques entre bâtiments.

L'objectif du chapitre est donc de définir les caractéristiques des données de consommations énergétiques nécessaires au calcul des impacts environnementaux de ces consommations pendant la phase d'usage du bâtiment.

- La section 3.1 présente de manière plus détaillée les problématiques rencontrées pour l'intégration de l'approche énergétique dans l'ACV.
- La section 3.2 s'intéresse plus particulièrement à l'influence du pas de temps sur le bilan énergétique des bâtiments producteur d'énergie.
- La section 3.3 est focalisée sur le bilan énergétique des îlots producteurs d'énergie.
- Enfin, la section 3.4 synthétise les travaux présentés dans ce chapitre, rappelle les conclusions obtenues et définit les objectifs pour le prochain chapitre.

3.1 Problématiques

Dans la pratique actuelle de l'ACV bâtiment, des résultats de SED ou de calcul réglementaire sont utilisés comme données d'entrées pour prendre en compte les impacts des consommations d'énergie du bâtiment. La SED ou le calcul réglementaire permettent d'estimer les consommations d'énergie du bâtiment pour les différents postes de consommations (chauffage, éclairage, ECS...) et sont le plus souvent effectués au pas de temps horaire. Pour être utilisés en ACV, ces résultats, les consommations énergétiques du bâtiment par usage, doivent être exprimés en énergie finale et sont sommés pour obtenir une consommation annuelle par vecteur énergétique. Le passage des consommations d'énergie primaire à celles en énergie finale se fait en utilisant les coefficients figés de la méthode réglementaire.

Or, lorsqu'une production locale d'énergie doit être considérée, les normes française et européenne sur la performance environnementale des bâtiments demandent à ce qu'une distinction soit faite entre l'énergie auto-consommée, i.e. consommée sur site, et celle importée. En effet, ces deux énergies ne sont pas issues des mêmes sources de production et n'ont donc pas les mêmes impacts. Cependant, aucune norme ou réglementation ne précise la méthode et le pas de temps à utiliser pour effectuer ce bilan. Les travaux de la tâche 40 de l'IAE (Sartori *et al.*, 2012) identifient différents types de bilans énergétiques pour les bâtiments avec production d'énergie sur site : bilan import-export, bilan charge-production et bilan net mensuel. Seul le premier permet le calcul de l'énergie produite et auto-consommée et peut donc être utilisé pour l'ACV de bâtiment. Les autres bilans, basés sur la génération et la charge, sont utilisés lorsque les données sur la consommation des occupants sont manquantes et que les quantités d'énergie livrée et exportée ne peuvent être estimées.

En outre, la production locale d'énergie et les consommations d'un bâtiment varient au cours du temps et ne sont pas synchrones. La figure 3.1 est une illustration de ce non synchronisme entre consommation et production pour le cas d'une maison individuelle équipée de panneaux photovoltaïques. Ainsi, selon le pas de temps considéré, les parts d'énergie auto-consommée, importée et exportée vont varier même si la demande totale et la production totale du bâtiment restent les mêmes.

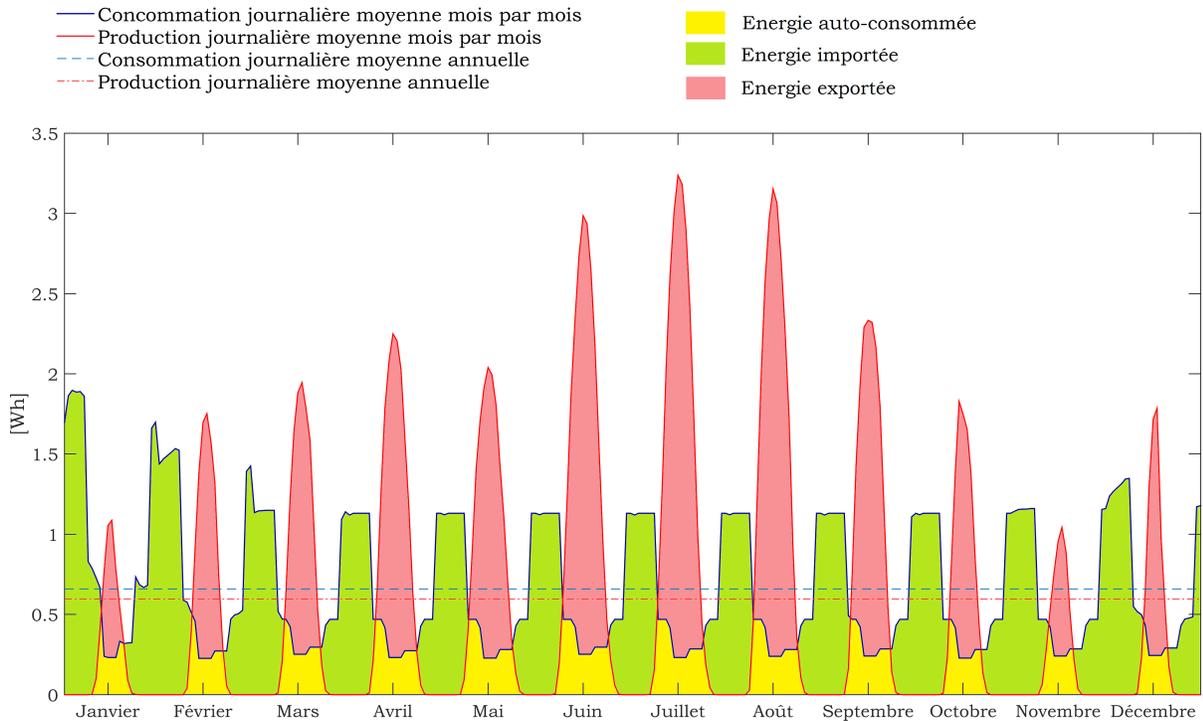


FIGURE 3.1 – Variations journalières de la consommation et de la production photovoltaïque pour une maison individuelle et identification des énergies auto-consommée, exportée et importée

Nous devons donc étudier si les interactions entre un bâtiment producteur d'énergie et le réseau doivent être étudiées à des pas de temps inférieurs à l'année car malgré la présence d'une production locale d'énergie, le bâtiment peut par exemple contribuer à augmenter les pointes de charge. Nous aborderons ce problème dans la section 3.2.

Par ailleurs, si l'échelle spatiale d'évaluation est étendue (e.g. îlot, quartier, ville, territoire), un bilan énergétique intrinsèque au bâtiment ne suffit plus à évaluer les phénomènes physiques à l'œuvre. En effet, un bâtiment peut utiliser de l'énergie renouvelable en profitant de la synergie que peut créer un ensemble de bâtiments (mutualisation des productions en utilisant les meilleurs emplacements, foisonnement des consommations qui permet une éventuelle meilleure autoconsommation de la production). Il est donc nécessaire de comprendre comment doit être effectué le bilan import/export dans ce cas particulier ; ce point sera développé dans la section 3.3.

Que ce soit pour l'étude du pas de temps ou du périmètre spatial, la problématique est celle d'un phénomène continu que nous essayons de discrétiser (temporellement ou spatialement) de manière à obtenir un résultat pertinent tout en minimisant le temps de calcul.

3.2 Bâtiments producteurs d'énergie : influence du pas de temps sur le bilan énergétique d'un bâtiment

Dans cette section, nous commencerons par présenter le calcul des indicateurs énergie auto-consommée, exportée et importée pour un bâtiment avec production locale d'énergie. Par la suite, nous étudierons l'influence du pas de temps de calcul sur ces indicateurs et cela pour différents cas d'étude.

Tout d'abord, il faut préciser que des travaux sur le pas de temps ont été menés dans plusieurs domaines liés à l'énergétique du bâtiment. Rodler *et al.* (2013) ont montré que l'utilisation d'un pas de temps inférieur à l'heure pour les données météorologiques (plus particulièrement pour la tâche solaire) améliore les résultats de SED. Page *et al.* (2008) ont, quant à eux, travaillé sur les profils temporels de présence des occupants pour y inclure des variations temporelles.

A notre connaissance, il n'y a pas eu de travaux sur le pas de temps à utiliser pour le bilan énergétique import-export et son utilisation en ACV.

3.2.1 Définition du bilan import-export

La différenciation entre la part d'énergie auto-consommée, la part d'énergie importée et la part d'énergie exportée peut être obtenue sur une année en calculant à chaque instant l'excès ou le déficit d'énergie entre la puissance demandée par consommation du bâtiment et la puissance produite sur site. Cette évaluation nécessite une connaissance de la demande du bâtiment en fonction du temps et de la production locale en fonction du temps selon un pas de temps commun et « adéquat » que nous cherchons précisément à déterminer. En effet, le pas de temps doit permettre d'obtenir un résultat pertinent tout en minimisant le temps de calcul.

Si le pas de temps est noté Δt et que N correspond à la base de temps souhaitée pour l'observation (e.g. une année) ; le bilan énergétique import-export est ainsi défini :

$$E_{exportée_i} = \sum_{t=0}^N \max(P_{produite_{i,t}} - P_{appelée_{i,t}}; 0) \times \Delta t \quad (3.1)$$

$$E_{autoconsommée_i} = \sum_{t=0}^N \min(P_{appelée_{i,t}}; P_{produite_{i,t}}) \times \Delta t \quad (3.2)$$

$$E_{importée_i} = \sum_{t=0}^N \max(P_{appelée_{i,t}} - P_{produite_{i,t}}; 0) \times \Delta t \quad (3.3)$$

$P_{produite_{i,t}}$ est la puissance moyenne produite par le système de production local pendant le pas de temps Δt pour le type d'énergie i et $P_{appelée_{i,t}}$ est la puissance moyenne nécessaire pour assurer la demande énergétique des usages considérés dans l'étude pendant le pas de temps Δt , pour le type d'énergie i .

$E_{autoconsommée_i}$ est l'énergie moyenne de type i fournie par le système de production locale et utilisée pour assurer la demande énergétique des usages considérés dans l'étude pendant un an.

$E_{importée_i}$ est l'énergie moyenne de type i fournie par l'importation d'énergie sur la parcelle nécessaire et utilisée pour assurer la demande énergétique des usages considérés dans l'étude pendant un an.

$E_{exportée_i}$ est l'énergie moyenne exportée pour le type d'énergie i pendant un an.

Quelque soit le pas de temps choisi, l'énergie totale annuelle contenue dans chacun des profils $P_{produite_{i,t}}$ et $P_{appelé_{i,t}}$ est la même.

Ce bilan énergétique import-export implique des opérateurs min et max non linéaires et il n'y a aucune raison *a priori* que le calcul soit insensible à la base de temps. Nous pouvons même démontré que :

- La part exportée sera toujours sous-estimée par rapport à l'énergie réellement exportée ;
- La part auto-consommée sera toujours surestimée par rapport à l'énergie réellement auto-consommée ;
- La part importée sera toujours sous-estimée par rapport à l'énergie réellement importée.

En effet, en agrégeant temporellement, nous utilisons des moyennes mobiles sur nos échantillons qui ont pour effet de lisser ces derniers. Si nous considérons que notre échantillon de référence à n valeurs $(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \in \mathfrak{R}$ et que notre agrégation se fait tous les N éléments (avec $N \leq n$), notre échantillon agrégé s'écrit :

$$\bar{x}_j = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_{j-k} \quad (3.4)$$

avec $i \in [1; \frac{n}{N}]$ et $j = i \times N$

$$\text{Or, } \forall x, y \in \mathfrak{R} \max(x; 0) = \frac{x+|x|}{2} \text{ et } \min(x; y) = \frac{x+y-|x-y|}{2}.$$

Donc, en utilisant le maximum sur l'échantillon obtenu grâce à la moyenne mobile comme cela est fait pour le calcul de l'énergie importée et exportée, nous obtenons :

$$\max(\bar{x}_j; 0) = \max\left(\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_{j-k}; 0\right) \quad (3.5)$$

$$= \frac{1}{2N} \left(\sum_{k=0}^{N-1} x_{j-k} + \left| \sum_{k=0}^{N-1} x_{j-k} \right| \right) \quad (3.6)$$

$$\leq \frac{1}{2N} \sum_{k=0}^{N-1} (x_{j-k} + |x_{j-k}|) \quad (3.7)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \max(x_{j-k}; 0) \quad (3.8)$$

Nous serons donc enclins à sous-estimer les parts d'énergie importée et exportée par rapport à la réalité. De même, pour le calcul de l'autoconsommation, sauf que nous utilisons l'opérateur minimum (le signe sera inversé) et nous aurons donc tendance à surestimer l'autoconsommation par rapport au cas du calcul de référence. Les biais résultant de l'agrégation temporelle ne seront donc jamais des biais à moyenne nulle.

Par ailleurs, si la production annuelle est nulle ou petite par rapport à la demande annuelle le résultat tend à être indépendant du pas de temps p (0 % exportée et 100 % auto-consommée) ; c'est le cas si le bâtiment n'est, par exemple, pas ou peu équipé en système photovoltaïque.

Maintenant que nous avons défini les parts respectives d'énergie auto-consommée, exportée et importée, nous avons pour but de déterminer comment évoluent ces indicateurs en fonction du pas de temps considéré par le calcul sur différents cas d'étude.

3.2.2 Cas d'étude - Description

Pour nos cas d'étude, nous devons disposer de bâtiments producteurs d'énergie ; de plus, pour anticiper les futures exigences réglementaires, nous préférons que ces bâtiments soient BEPOS. Plus précisément, comme nous nous intéressons au bilan énergétique import-export nous devons disposer de courbes de charge de bâtiments et de courbes de production locale d'énergie dont nous dégraderons la résolution temporelle de manière progressive. L'énergie consommée et l'énergie produite annuellement restent les mêmes quelque soit la résolution temporelle.

Du fait de la disponibilité des données et du nombre croissant de systèmes photovoltaïques (PV) installés sur les parcelles des bâtiments (Lambert *et al.*, 2012), nous choisissons de concentrer cette étude sur le vecteur électrique et la production électrique photovoltaïque. Ainsi, pour étudier l'influence du pas de temps sur le bilan énergétique import-export de l'électricité, nous proposons une démarche empirique qui consiste à itérer les calculs des imports-exports précédents pour différents pas de temps et différents binômes logements/système PV.

3.2.2.1 Profils de consommation

En termes de profils de demande d'électricité ces travaux considèrent uniquement la typologie d'usage logement, et plus particulièrement de type maison individuelle, ceci à défaut de disposer d'autres données. Cependant, la méthodologie décrite ici est applicable à tout autre cas de figure. Plusieurs lots de courbe de charge sont exploités ici :

- Lot n°1 : 49 courbes de charges électriques à 10 minutes issues des mesures effectuées par Enertech en 2002-2003 (Sidler, 2004). Elles correspondent à des logements sans systèmes de chauffage, de refroidissement (ventilation comprise) ou de production eau chaude sanitaire électrique. Les seuls usages considérés sont donc l'éclairage et les usages spécifiques de l'électricité. Ainsi, ces mesures sont une approche de la demande électrique telle que présentée par des bâtiments à haute efficacité énergétique sans utilisation de vecteur électrique comme source d'énergie pour les systèmes réglementés (hors éclairage). Une présentation des courbes de charges est disponible dans l'annexe A.1.
- Lot n°2 : 300 courbes de charges électriques à 1 minute fabriquées par un outil R&D CSTB, QIRIEL, qui en l'état actuel représente strictement l'éclairage et les usages spécifiques de l'électricité des maisons individuelles (Gay et Schetelat, 2013; Daignan, 2013).

3.2.2.2 Profils de production

En termes de profils de production locale le seul type d'énergie considérée ici est de l'électricité photovoltaïque. Nous disposons de neuf profils temporels de production photovoltaïque calculés sur la base de données météorologiques de température et d'ensoleillement synthétiques à une minute (outil Météonorm (Remund *et al.*, 2014)) transformée par un modèle physique en production électrique active. L'orientation, le lieu considéré et la technologie sont maîtrisables. Le modèle physique est décrit ci-dessous. Les profils sont calculés sur une base d'une minute.

3.2.2.2.1 Données météorologiques

Les données météorologiques, l'ensoleillement total incident G et la température ambiante de l'air T_a , sont calculés par l'outil Météonorm au pas de temps de 1 minute pendant une année. Les calculs sont propres à un lieu et une orientation donnés. Pour les deux lots de courbes de charges, nous avons retenu les neuf cas de configuration photovoltaïque à iso pente de 20° suivants :

1. Marseille – Azimut : 0° (Sud)
2. Marseille – Azimut : -45°
3. Marseille – Azimut : 45°
4. Paris – Azimut : 0°
5. Paris – Azimut : -45°
6. Paris – Azimut : 45°
7. Oostende – Azimut : 0°
8. Oostende – Azimut : -45°
9. Oostende – Azimut : 45°

Nous avons choisi ces trois villes car elles sont représentatives de l'ensoleillement en France. Les masques ne sont pas considérés ici. L'année considérée n'est pas une année réelle et il est impossible de la rattacher explicitement à l'année d'enregistrement des courbes de charges. En d'autres termes, les données météorologiques utilisées dans la modélisation de la production ne sont pas cohérentes avec que celles qui ont conduit aux courbes de charge ; cela vaut *a priori* particulièrement pour le poste éclairage.

3.2.2.2.2 Description succincte de la modélisation de la production photovoltaïque

La modélisation du système photovoltaïque est détaillée en annexe A.2.

Le calcul de la production PV sur la base de données météorologiques (ensoleillement total incident et température d'air extérieur) prend en compte une modélisation physique simple qui permet de prendre en compte :

- une baisse du rendement du module PV lorsque l'ensoleillement diminue
- une baisse du rendement module PV lorsque la température des modules PV croît
- un taux de perte par connectique (puissance dissipée dans les câbles et connexions)

- une baisse du rendement de l'onduleur lorsque sa charge électrique diminue
- un démarrage de l'onduleur sur un seuil minimum de puissance PV
- une saturation de l'onduleur sur un seuil de puissance maximum (en principe cette fonctionnalité est très peu activée)

Le modèle ne prend pas en compte, entre autres, la neige, le vent (incidence sur l'état thermique), les salissures, les pertes lumineuses par réflexion par rapport à une incidence normale au module, les dynamiques de la fonctionnalité MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) (de l'ordre de l'infra seconde) les aléas de déconnexions réseaux, les pannes, les défauts de mise en œuvre et le foisonnement s'il y a plusieurs onduleurs ou si nous considérons que le champ photovoltaïque est en fait constitué de plusieurs champs photovoltaïques soumis à des conditions d'intégration et de météo différentes (approche quartier).

En ce qui concerne la surface de modules photovoltaïques pour les cas d'étude, nous avons considéré, pour simplifier, que la surface de la toiture est 1,2 fois celle du logement (donnée dans les lots de courbes de charge). Nous considérons que les modules PV occupent totalement une demi-toiture bi-pente de 20° orientée Sud, Sud-est ou Sud-ouest. Tous les paramètres définis dans cette section visent à obtenir le maximum de production photovoltaïque et donc à se positionner dans une approche BEPOS.

3.2.3 Indicateurs calculés

Pour chaque binôme [logement ; production photovoltaïque], le bilan énergétique défini à la section 3.2.1 est réalisé pour les pas de temps suivants (pas de temps choisi comme multiples croissants du temps de référence (1 ou 10 minutes)) :

- 10, 20, 30 et 60 minutes, 4h (soient 240 minutes), 36,5 jours (soient 871 h ou 52560 minutes) et 1 an (soient 525 600 minutes) pour le lot n°1 de courbe de charge à 10 minutes
- 1, 2, 5, 10, 20 minutes et 60 minutes, 10h (soient 600 minutes), 87,6 h (soient 3,65 jours ou 5260 minutes), 36,5 jours (soient 871 h ou 52560 minutes) et 1 an (soient 525 600 minutes) pour le lot n°2 de courbes de charge à 1 minute

Par ailleurs, même si le bilan import-export est réalisé avec un pas de temps très fin, la base d'observation des différents indicateurs est horaire ou annuelle. En effet, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, les données environnementales du vecteur électrique sont sur une base de temps horaire ou annuelle. Or comme montré dans (Fouquet *et al.*, 2013), la base de temps doit être la même entre les données environnementales des vecteurs énergétiques et les données de consommations énergétiques du bâtiment.

Les indicateurs observés sont les suivants :

R_{exp}^N , défini comme le ratio entre l'énergie photovoltaïque exportée E_{exp}^N et la demande électrique totale E_{CdC}^N sur la base de temps d'observation de N (annuelle ou horaire) :

$$R_{exp}^N = E_{exp}^N / E_{CdC}^N \quad (3.9)$$

R_{PV}^N , défini comme le ratio entre l'énergie photovoltaïque produite E_{PV}^N et la demande électrique totale E_{CdC}^N sur la base de temps d'observation de N.

Nota Bene : sur la base annuelle (N=1 an), il donne une mesure du taux de couverture annuelle (observé sur un an) de la demande électrique du bâtiment par le système photovoltaïque.

$$R_{PV}^N = E_{PV}^N / E_{CdC}^N \quad (3.10)$$

R_{imp}^N , défini comme le ratio entre l'énergie électrique importée sur le réseau E_{imp}^N et la demande électrique totale E_{CdC}^N sur la base de temps d'observation de N :

$$R_{imp}^N = E_{imp}^N / E_{CdC}^N \quad (3.11)$$

R_{aut}^N , défini comme le ratio entre la production photovoltaïque auto-consommée et la demande électrique totale sur la base de temps d'observation de N :

$$R_{aut}^N = E_{aut}^N / E_{CdC}^N \quad (3.12)$$

Par définition des indicateurs précédents :

$$R_{imp}^N = 1 - R_{aut}^N \quad (3.13)$$

et

$$R_{PV}^N = R_{exp}^N + R_{aut}^N \quad (3.14)$$

L'erreur $Er_{indicateur, \Delta t}^N$ commise sur l'un des indicateurs précédents observé sur une base de temps N et calculé sur un pas de temps Δt du bilan d'énergie import-export par rapport au pas de temps de référence ($\Delta t_{ref} = 1$ ou 10 minutes selon le lot de courbes de charge) est définie de la manière suivante (exemple pour l'indicateur R_{imp}^N) :

$$Er_{R_{imp}, \Delta t}^N = \frac{R_{imp}^N(\Delta t)}{R_{imp}^N(\Delta t_{ref})} \quad (3.15)$$

Pour calculer ces indicateurs, la méthodologie générale suivante est appliquée et réitérée pour chaque logement, chaque météo et chaque pas de temps Δt du bilan import-export et de temps d'observation N :

1. Calcul de la production photovoltaïque au pas de temps de référence, Δt_{ref} , identique à celui du profil de demande électrique du bâtiment ($\Delta t_{ref} = 10$ min ou 1 min)
2. Calcul des indicateurs (import, export et autoconsommation) sur la base de temps de calcul Δt_{ref}
3. Calcul et étude des indicateurs en fonction du pas de temps Δt . Les indicateurs R_{exp}^N , R_{imp}^N et R_{aut}^N étant reliés entre eux, seulement R_{imp}^N est représenté pour chaque pas de temps, chaque logement et chaque météo.

Le logiciel utilisé pour ces calculs est Matlab.

3.2.4 Résultats des cas d'étude

Rappel : les résultats suivants sont valables pour le vecteur électrique et pour des maisons individuelles dont une demi-toiture est totalement couverte de modules photovoltaïques et dont les systèmes de chauffage, de refroidissement et de production d'eau chaude sanitaire ne fonctionnent pas avec le vecteur électrique.

3.2.4.1 Référence temporelle de 10 minutes

La figure 3.2 représente pour les logements du lot n°1 et les différentes configurations photovoltaïques l'évolution du calcul du ratio d'énergie annuelle importée sur l'année en fonction des différents pas de temps choisis pour le bilan d'import-export (10 min, 20 min, 30 min, 1h, 4h, 36,5 jours et un an). Cette figure montre qu'une base de temps annuelle pour le calcul d'import-export ne permet pas de prendre en compte la réalité des échanges électriques avec le réseau : *pour la plupart des cas, un calcul avec un pas de temps annuel, donne un ratio d'énergie importée nul alors qu'avec le pas temps de référence à 10 minutes ce ratio se situe entre 50 % et 80 %*. Nous observons que certaines courbes présentent un ratio d'énergie importée non nul même sur une base annuelle. Ces courbes représentent toutes le même logement (n°33 du lot n°1) avec différentes productions photovoltaïques (variations de la localisation et de l'orientation). Or, comme nous pouvons l'observer sur la figure A.1 de l'annexe A.1, la consommation par m² de ce logement est particulièrement élevée. Le choix de surface PV installée dans notre modélisation ne permet pas alors d'obtenir un taux de couverture de 100 % et d'être dans une configuration BEPOS pour ce logement.

L'autoconsommation est comprise entre 20 % et 50 % pour ces logements. Enfin, même en prenant une base de temps horaire pour le calcul d'import-export, nous sous-estimons encore le ratio d'énergie importée.

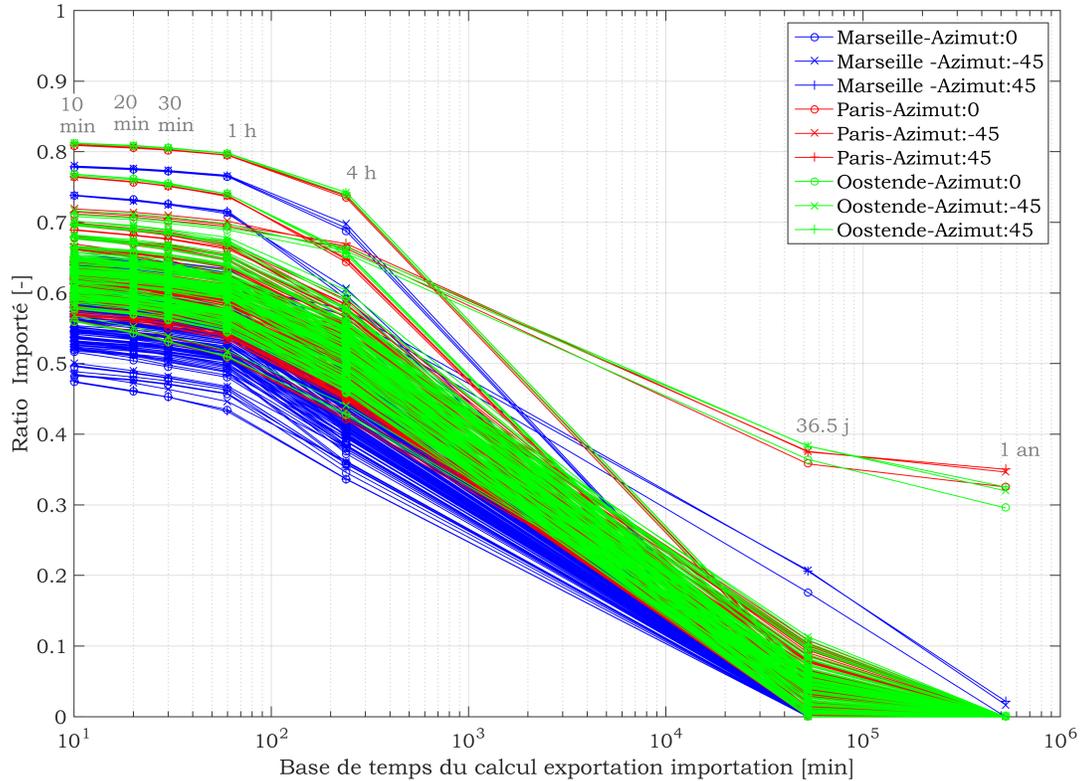


FIGURE 3.2 – Part d'électricité importée, R_{imp} , agrégée sur l'année, pour les logements BE-POS du lot n°1 en fonction du pas de temps du calcul d'exportation/importation

Les figures 3.3 et 3.4 représentent, respectivement, l'erreur relative et l'erreur absolue (en $\text{kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$) pour les logements du lot n°1 lorsque le pas de temps considéré pour le calcul d'import/export est l'heure comparé au pas de temps de référence de 10 minutes. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'heure car c'est aujourd'hui le pas de temps auxquels les résultats de SED sont le plus souvent calculés. Ainsi, un pas de temps horaire pour le bilan import-export semble assez facile à implémenter.

L'erreur (relative ou absolue) est toujours négative (comme expliqué à la section 3.2.1), *l'erreur relative ne dépasse pas 10 % (moyenne à 5 %) et l'erreur absolue est comprise entre -0.4 et -5.5 $\text{kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$. Cette dernière indique également que "plus le bâtiment est BEPOS" (i.e. plus son taux de couverture est grand), moins l'erreur absolue est importante.* Cette tendance est également vraie pour le ratio d'énergie auto-consommée. L'erreur absolue sur le ratio d'énergie exportée est, quant à elle, quasi stable avec l'évolution du taux de couverture.

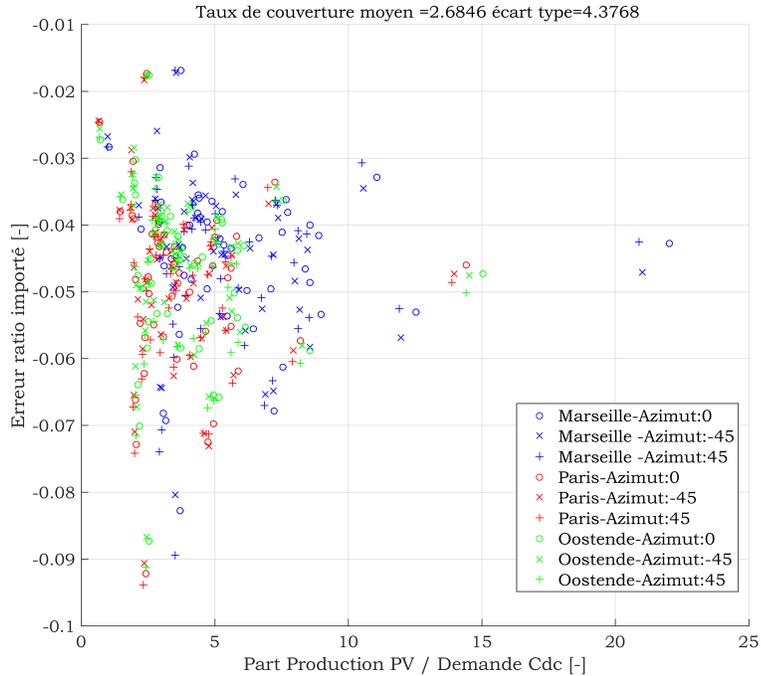


FIGURE 3.3 – Erreur relative sur la part d’électricité importée pour les logements BEPOS du lot n°1 pour un pas de temps horaire par rapport à un pas de temps de référence de dix minutes

Dans le cas de l’erreur absolue (Figure 3.4), nous observons une corrélation forte entre l’incertitude induite sur le calcul de l’énergie importée et le taux de couverture de la maison. Cela est dû au fait que le taux de couverture via la part de production photovoltaïque est directement proportionnel à la surface de la maison et que l’erreur sur l’énergie importée est elle-même divisée par la surface pour obtenir une indication en $\text{kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$ (courbe de la même forme que celle de la fonction inverse). Ainsi, plus la consommation annuelle par mètre carré est petite, plus l’incertitude est faible.

Les mêmes graphiques peuvent être présentés pour le calcul de l’énergie importée avec une agrégation temporelle horaire mais ils n’apportent pas d’informations complémentaires. Les mêmes tendances sont observées i.e. l’énergie importée est sous-estimée par rapport au calcul effectué avec le pas temps de référence.

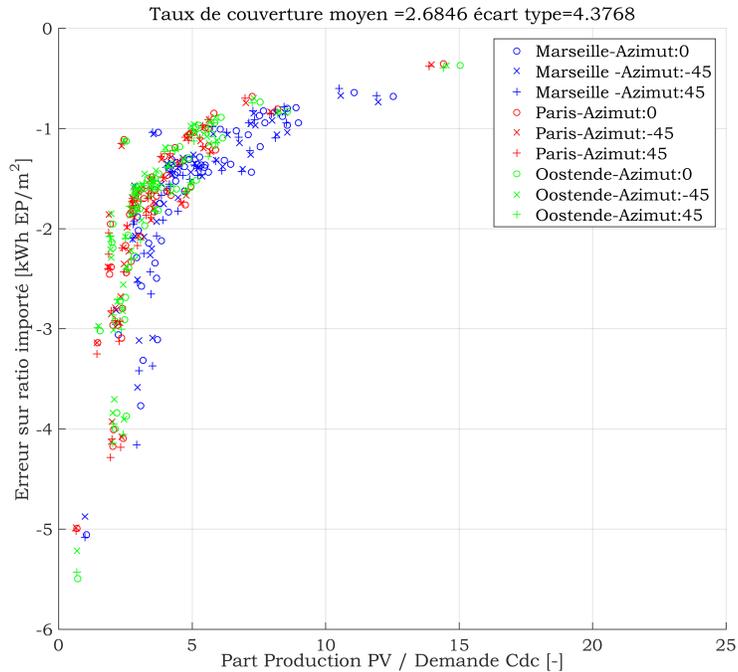


FIGURE 3.4 – Erreur absolue en kWh_{EP}/(m².an) sur la part d’électricité importée pour les logements BEPOS du lot n°1 pour un pas de temps horaire par rapport à un pas de temps de référence de dix minutes

3.2.4.2 Référence temporelle de 1 minute

La figure 3.5 représente, pour les logements du lot n°2 et les différentes configurations photovoltaïques, l’évolution du ratio d’énergie importée agrégée sur l’année en fonction des différents pas de temps choisis pour le calcul d’import-export (1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 20 min, 1h, 10h, 87,6 h, 36,5 jours et un an). Comme pour le lot précédent, cette figure montre qu’une base de temps annuelle pour le calcul d’import-export ne permet évidemment pas de prendre en compte la réalité des échanges électriques avec le réseau : pour la plupart des cas, un calcul sur une base annuelle, donne un ratio d’énergie importée nul alors qu’avec une base de référence à 1 minute ce ratio se situe entre 52 % et 79 %. Autrement dit, l’autoconsommation est de l’ordre de 30 à 40 % pour ces logements. Par ailleurs, en prenant une base de temps horaire pour le calcul d’import-export, l’asymptote des courbes d’évolution du ratio d’énergie importée n’est pas encore atteinte.

Là encore, nous retrouvons un logement qui, même avec un pas de temps annuel, a un ratio d’énergie importée non nul. La consommation par mètre carré de ce logement est grande et la quantité de modules photovoltaïque considérée ne parvient pas à compenser cette consommation.

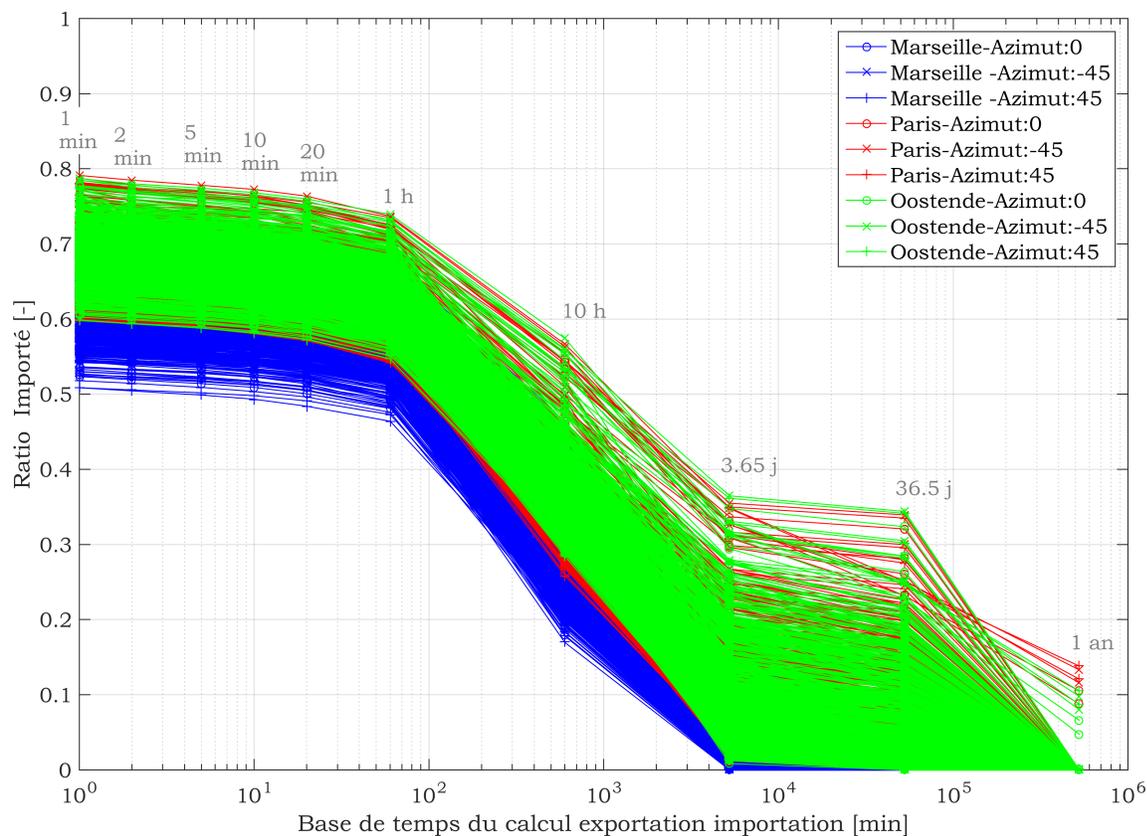


FIGURE 3.5 – Part d’électricité importée agrégée sur l’année pour les logements BEPOS du lot n°2 sans systèmes réglementés alimentés par l’électricité (hors éclairage) en fonction du pas de temps du calcul d’exportation/importation

Les figures 3.6 et 3.7 représentent, respectivement, l’erreur relative et l’erreur absolue (en $\text{kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$) pour les logements du lot n°2 lorsque le pas de temps considéré pour le calcul d’import-export est l’heure comparé au pas de temps de référence de 1 minute. Comme pour le lot n°1, l’erreur (relative ou absolue) est toujours négative (comme expliqué à la section 3.2.1). Les erreurs, relatives et absolues, sont cependant plus grandes, respectivement 18 % et 16 $\text{kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$ au maximum. En effet, la base de temps de référence est plus fine pour ce lot de courbes de (1 minute au lieu de 10). La discrétisation effectuée avec le calcul horaire est donc plus importante que pour une référence de 10 minutes. De même que pour le lot n°1, « plus le bâtiment est BEPOS » (i.e. son taux de couverture est grand), moins l’erreur absolue est importante.

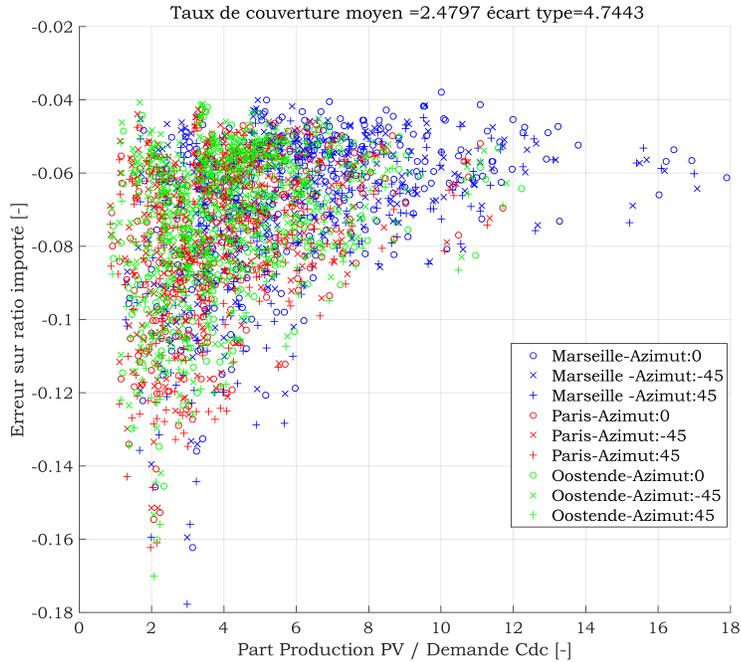


FIGURE 3.6 – Erreur relative sur la part d’électricité importée pour les logements BEPOS du lot n°2 pour un pas de temps horaire par rapport à un pas de temps de référence de une minute

Les courbes de charge à une minute utilisées ici sont encore expérimentales. Elles proviennent de modélisations des usages spécifiques de l’énergie dans des maisons individuelles et la validité de ces modélisations n’avaient pas encore été testées lors de la réalisation de notre étude. Pour valider les résultats obtenus, nous décidons de recalculer ces courbes de charge toutes les dix minutes. Ainsi, nous pouvons reprendre notre protocole et vérifier que nous obtenons bien les mêmes ordres de grandeur qu’avec les courbes de charge à 10 minutes issues de mesures.

Plus particulièrement, la figure 3.8 présente l’incertitude d’un calcul horaire par rapport à un calcul à 10 minutes pour le lot n°2 recalculé à 10 minutes. L’incertitude absolue est au maximum d’environ 10 % et la moyenne de l’ordre de 5 %, tout comme le lot de logements n°1. Nous pouvons donc considérer dans ces travaux que cet ensemble de courbes de charge à 1 minute nous donne une indication raisonnable de ce qui se passerait si nous disposions effectivement de courbes de charge à 1 minute issues de mesures.

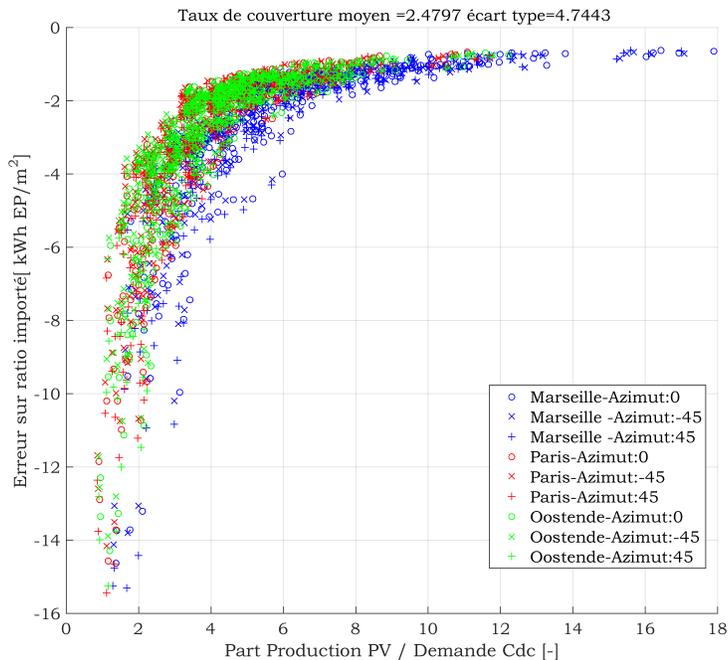


FIGURE 3.7 – Erreur absolue en kWh_{EP}/(m².an) sur la part d’électricité importée pour les logements BEPOS du lot n°2 pour un pas de temps horaire par rapport à un pas de temps de référence de une minute

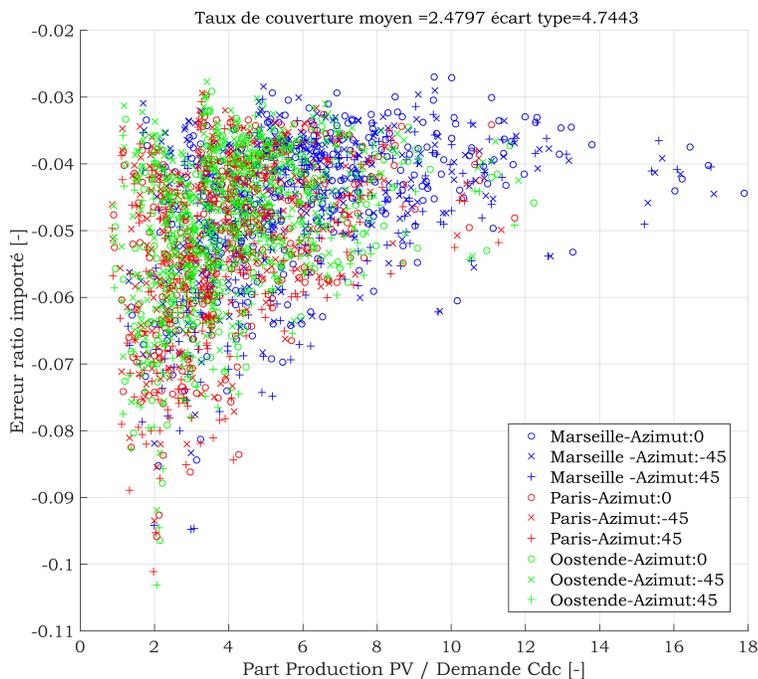


FIGURE 3.8 – Erreur relative sur la part d’électricité importée pour les logements BEPOS du lot n°2 pour un pas de temps horaire par rapport à un pas de temps de référence de 10 minutes

3.2.4.3 Robustesse des résultats

3.2.4.3.1 Bâtiments non BEPOS

Les calculs précédents ont été volontairement centrés sur des BEPOS, *a priori* futur standard de construction en 2020. Nous avons donc considéré des maisons individuelles avec une production photovoltaïque annuelle plus grande que la demande électrique annuelle (taux de couverture annuel moyen de 2,68 pour le lot n°1 et de 2,48 pour le lot n°2). Pour obtenir de tels taux de couverture, le dimensionnement de système PV a été fait sur la base de l'information de la surface habitable (cf. 3.2.2.2). Cependant, il est intéressant de vérifier si les ordres de grandeur d'énergie importée et d'auto-consommation sont conservés pour des logements pratiquement à l'équilibre production / demande sur une base annuelle. Plus précisément, nous voulons vérifier si un pas de temps annuel est cette fois-ci suffisant pour le bilan énergétique.

La figure 3.9 présente donc de nouveau la part d'énergie importée pour différents pas de temps pour le lot n°1. La figure 3.10 expose, quant à elle, les erreurs relative et absolue induites par un calcul au pas de temps horaire au lieu d'un calcul à 10 minutes. Cependant, le taux de couverture annuel moyen est, cette fois-ci, de 0,89 donc les bâtiments ne sont pas BEPOS (pour le photovoltaïque seul). Mise à part pour certains logements dont le taux de couverture est déjà bas annuellement, un calcul annuel pour le bilan d'énergie import/export n'est évidemment toujours pas suffisant. L'autoconsommation est toujours comprise entre 30 et 40 %. Les erreurs respectent les mêmes ordres de grandeurs que les cas précédents.

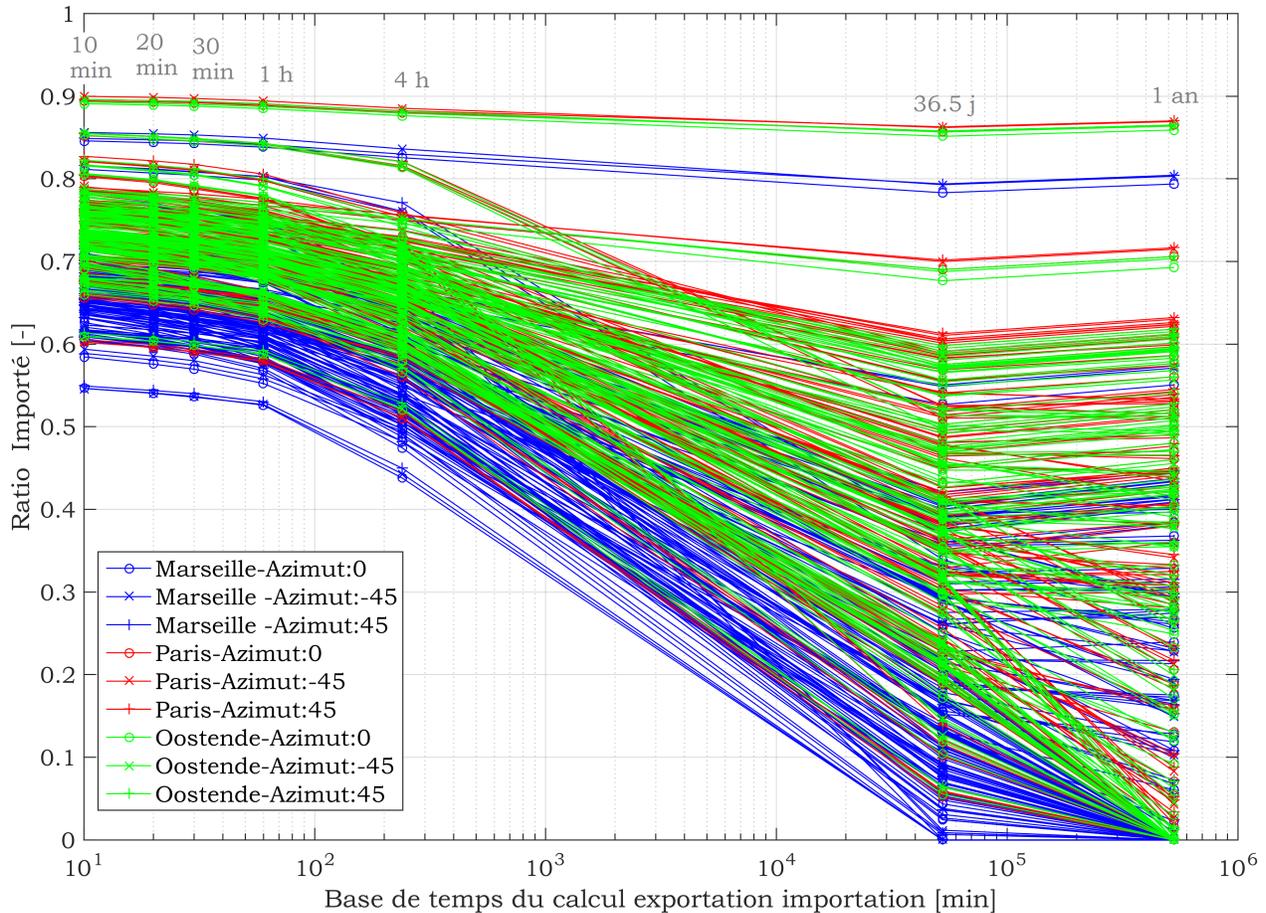


FIGURE 3.9 – Part d’électricité importée agrégée sur l’année pour les logements du lot n°1 sans systèmes réglementés alimentés par l’électricité (hors éclairage) en fonction du pas de temps du calcul d’exportation/importation – Cas d’une production photovoltaïque globalement à l’équilibre par rapport à la demande annuelle en moyenne pour l’ensemble des cas

3.2.4.3.2 Logements collectifs

Les courbes de charges des logements précédents peuvent également être additionnées pour obtenir des courbes de charges théoriques de logements collectifs. Nous voulons savoir si le foisonnement des courbes de charge change le pas de temps auquel doit être effectué le bilan énergétique import-export.

A partir du lot de courbes de charge n°1, différentes configurations ont été retenues pour obtenir 30 immeubles de logements collectifs de deux à sept niveaux avec une surface cohérente (i.e. une même surface par niveaux). Un détail des différentes configurations est disponible à l’annexe A.3.

Concernant la production photovoltaïque, le modèle présenté en 3.2.2.2 est conservé, seule la surface installée change. La toiture des logements collectifs est considérée comme plate, sa surface étant toujours considérée comme 1,2 fois celle d’un niveau (à défaut d’autres informations). Cependant, nous considérons que 20 % de la surface de la toiture est estimée non exploitable pour l’installation de modules photovoltaïques car déjà utilisée par d’autres équi-

Taux de couverture moyen =0.53693 écart type=0.87537

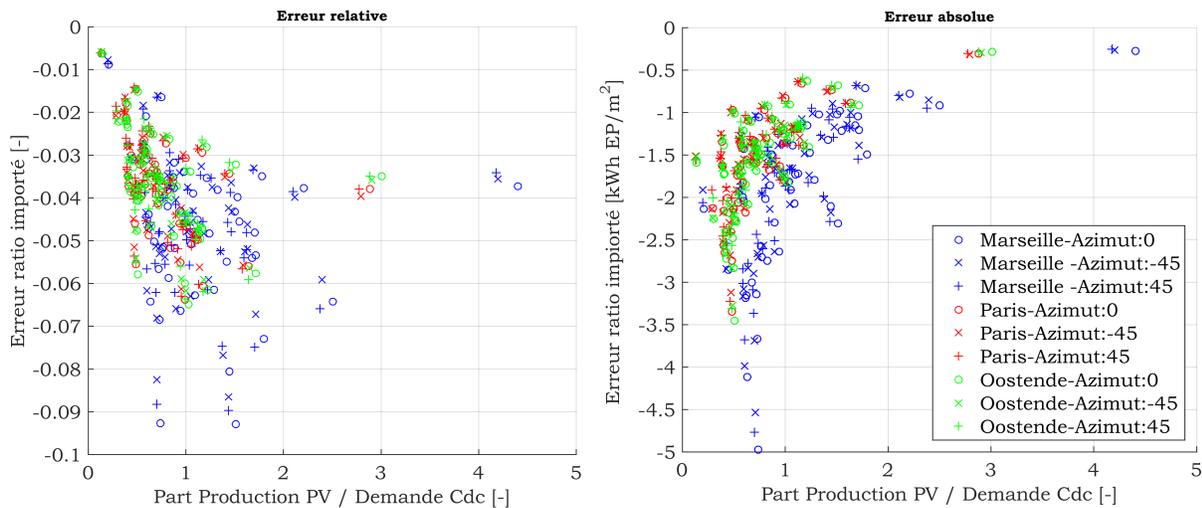


FIGURE 3.10 – Erreur relative et erreur absolue en $\text{kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$ sur la part d'électricité importée pour le lot de logements n°1 pour un pas de temps horaire par rapport à un pas de temps de référence de 10 minutes – Cas d'une production photovoltaïque plus faible que la demande

pements (gainés de ventilation, sorties de cheminées, etc.). La surface des modules installés correspond donc ici à celle d'un niveau de l'immeuble.

La figure 3.11 présente la part d'électricité importée en fonction du nombre de logements et cela pour différents pas de temps du bilan énergétique.

Nous aurions pu penser qu'avec l'augmentation du nombre de logements dans l'immeuble (i.e. augmentation du foisonnement) le pas de temps du bilan énergétique pourrait être diminué. Or, même lorsque le nombre de logements est grand, un calcul annuel pour le bilan import-export ne permet pas d'atteindre le ratio d'énergie "réellement" importé.

Par ailleurs, il y a peu d'influence du foisonnement sur le ratio d'énergie importée; ce dernier, calculé à 10 minutes, est quasi stable peu importe le nombre de logements. Pourtant, il faut noter qu'une des limites de cette analyse est le faible nombre de logements par immeuble (limité par les données disponibles).

Ainsi, pour ces petits immeubles de logements collectifs, l'autoconsommation est toujours de l'ordre de 40 % (comme pour le bilan import-export du lot n°1 de courbes de charge à 10 minutes).

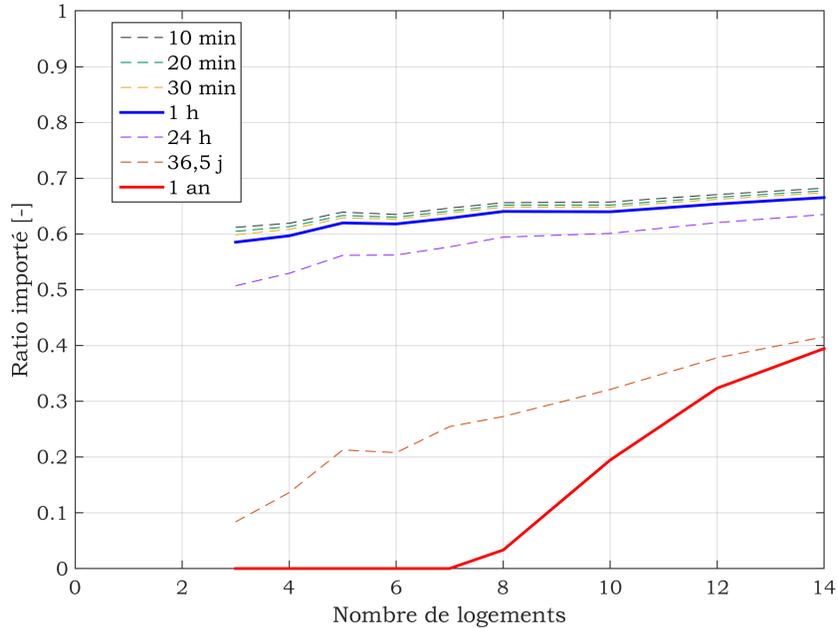


FIGURE 3.11 – Part d’électricité importée agrégée sur l’année pour des logements collectifs sans systèmes réglementés alimentés par l’électricité (hors éclairage) en fonction du pas de temps du calcul d’exportation/importation et du nombre de logements

3.2.5 Conclusions

Pour nos différents cas d’étude, il apparaît qu’un bilan énergétique effectué avec un pas de temps annuel ne permet pas de prendre en compte la réalité des échanges avec le réseau électrique.

Un bilan énergétique d’import-export réalisé avec un pas de temps horaire entraîne une incertitude de l’ordre de 5 à 10 %, par rapport à un pas de temps plus fin tel que 10 minutes ou 1 minute. Aujourd’hui, le pas de temps horaire apparaît comme un bon compromis en termes de résultats et de réalisation (les calculs SED sont aujourd’hui effectués au pas de temps horaire). Pour les BEPOS, une autoconsommation naturelle de 30 à 50 % est observée.

Les conclusions précédentes ne s’appliquent que pour les cas particuliers de logements étudiés ci-dessus, i.e. des logements, individuels ou collectifs, équipés de panneaux photovoltaïques et dont les systèmes de chauffage, de refroidissement et d’ECS ne fonctionnent pas grâce à l’électricité, des données météo sous-jacentes à la production PV et à la demande électrique non cohérentes. Aujourd’hui, en France, les logements n’utilisant pas d’électricité pour le chauffage, l’ECS et le refroidissement représentent tout de même environ 50 % du parc (ADEME, 2013). Cela ne comprend pas l’incertitude liée à la non connaissance des courbes de charges au-delà de la question de la résolution temporelle.

Cependant, l’incertitude sur la quantité d’énergie importée calculée ici doit ensuite être confrontée aux autres incertitudes du calcul des impacts environnementaux du contributeur énergie. Ce point sera traité dans le prochain chapitre.

Dans la section suivante, nous allons nous intéresser à la caractéristique spatiale du bilan énergétique, i.e. au bilan énergétique d’un îlot producteur d’énergie.

3.3 Extensions aux îlots producteurs d'énergie

A l'échelle de l'îlot, la problématique n'est plus seulement celle du pas de temps mais également celle des frontières physiques d'évaluation du système. En effet, si la performance est évaluée à l'échelle de l'îlot, comment les interactions entre bâtiments, et plus particulièrement la mutualisation des usages, doivent-elles être considérées ?

La problématique est différente pour un immeuble collectif. En effet, pour ce dernier, la production et la consommation sont facilement identifiables (il y a une production pour l'immeuble et la consommation est la somme de la consommation de chaque logement et des parties communes). Pour un îlot, chaque bâtiment a sa consommation et éventuellement une production mais peut également utiliser la production d'un autre immeuble. Il y a donc une multiplicité des sources de production et de consommation.

Pour l'ACV, l'enjeu vient du fait que celle-ci est basée sur le principe de modularité : les évaluations environnementales à l'échelle produit servent de base aux évaluations environnementales à l'échelle bâtiment (Schmincke, 2011). Ainsi, si nous voulons respecter ce principe, les évaluations environnementales à l'échelle du bâtiment doivent servir de base aux évaluations à l'échelle d'un îlot.

Dans cette section, nous allons montrer les différents bilans énergétiques réalisables à l'échelle de l'îlot puis les appliquer sur un exemple.

3.3.1 Bilan énergétique

Pour illustrer les différentes possibilités de calcul pour le bilan énergétique, nous prenons un cas d'étude fictif constitué de quatre bâtiments, chacun équipé de panneaux photovoltaïques.

3.3.1.1 L'îlot comme un système global

La première échelle possible pour la réalisation du bilan énergétique est celle de l'îlot. En sommant la consommation et la production de chaque bâtiment, nous obtenons la consommation totale, $C_{\text{îlot}}$, et la production totale, $P_{\text{îlot}}$, à l'échelle de l'îlot. Nous pouvons ensuite appliquer les équations 3.1 à 3.3 pour obtenir, à chaque pas de temps, le bilan énergétique import-export de l'îlot. La figure 3.12 illustre les frontières considérées pour ce bilan.



FIGURE 3.12 – Illustration des frontières du bilan énergétique pour l'îlot comme système global

3.3.1.2 Sans mutualisation

La seconde possibilité est de faire un bilan bâtiment par bâtiment et de considérer que les interactions énergétiques entre les bâtiments sont gérées à l'échelle des réseaux énergétiques seulement. En appliquant les mêmes équations (3.1 à 3.3), nous obtenons l'énergie importée, auto-consommée et exportée pour chaque bâtiment. La figure 3.13 illustre les frontières considérées pour ce bilan énergétique.



FIGURE 3.13 – Illustration des frontières pour le bilan énergétique sans prise en compte de la mutualisation des usages

3.3.1.3 Avec mutualisation

Enfin, nous pouvons effectuer un bilan bâtiment par bâtiment en prenant en compte les échanges entre ces derniers.

Pour cela, nous effectuerons tout d'abord le bilan énergétique de chaque bâtiment, comme défini par les équations 3.1 à 3.3, puis celui de l'îlot. Par la suite, nous devrons différencier l'énergie qui est consommée à l'échelle locale mais non auto-consommée par le bâtiment producteur, E_{ilot}^{loc} , de celle qui est importée/exportée de l'extérieur. Par définition, cette énergie correspond à toutes les énergies importées localement par les bâtiments mais également aux énergies exportées au niveau local par les bâtiments.

Pour cela, nous pouvons écrire pour chaque bâtiment qu'il importe/exporte de l'énergie localement ainsi que de l'extérieur :

$$E_{imp_i} = E_{imp_i}^{loc} + E_{imp_i}^{ext} \quad (3.16)$$

$$E_{exp_i} = E_{exp_i}^{loc} + E_{exp_i}^{ext} \quad (3.17)$$

Et à l'échelle de l'îlot :

$$E_{\text{îlot}}^{\text{loc}} = \sum_i E_{\text{imp}_i}^{\text{loc}} \quad (3.18)$$

$$= \sum_i E_{\text{exp}_i}^{\text{loc}} \quad (3.19)$$

$$= E_{\text{aut}_{\text{îlot}}} - \sum_i E_{\text{aut}_i} \quad (3.20)$$

Grâce à ces équations, nous pouvons donc déterminer la part d'énergie consommée localement par chaque bâtiment et ainsi prendre en compte la mutualisation des usages énergétiques. La figure 3.14 illustre les frontières et les interactions considérées pour ce bilan énergétique.

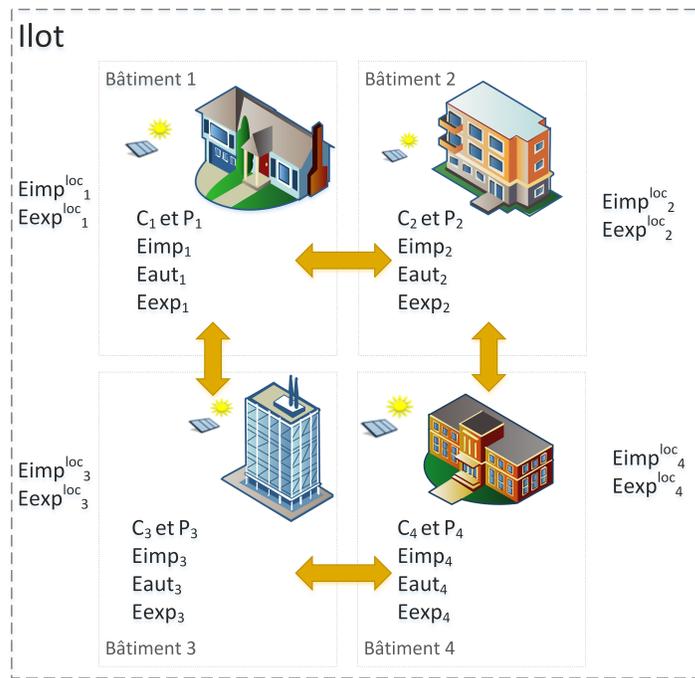


FIGURE 3.14 – Illustration des frontières pour le bilan énergétique avec prise en compte de la mutualisation des usages

Il faut noter que cette démarche est purement théorique car les connexions au réseau électrique peuvent être différentes au sein d'un même quartier (i.e. raccordement à deux branches différentes du réseau de distribution). Ainsi, il est souvent impossible de savoir si les bâtiments sont bien reliés au même point du réseau électrique et donc s'ils peuvent réellement échanger de l'énergie entre eux.

3.3.2 Illustration

Pour illustrer les différents périmètres de calcul identifiés précédemment, nous choisissons d'appliquer ces méthodes sur le bilan énergétique d'un îlot fictif. Celui-ci est constitué de deux immeubles de logements collectifs, d'une maison individuelle et d'un établissement scolaire.

La maison individuelle (MI) est un bâtiment de 140 m^2 SHON_{RT} équipé d'une chaudière gaz, d'un chauffe-eau thermodynamique et de 34 m^2 de panneaux photovoltaïques. Le premier immeuble de logements collectifs (LC7), 912 m^2 SHON_{RT} , est constitué de 7 logements avec chauffage électrique, chauffe-eau thermodynamique et est équipé de 480 m^2 de panneaux photovoltaïques. Le deuxième immeuble de logements collectifs (LC25) possède 25 logements, a une surface de $3\,270 \text{ m}^2$ SHON_{RT} et est équipé d'une chaudière bois, d'un chauffe-eau thermodynamique et de 480 m^2 de panneaux photovoltaïques. Enfin, l'établissement scolaire (ES) a une surface de $1\,672 \text{ m}^2$ SHON_{RT} et dispose d'une chaudière bois, d'un ballon d'eau chaude électrique et de 530 m^2 de panneaux photovoltaïques.

Tous ces bâtiments sont BEPOS sur l'année au sens de la RT actuelle i.e. pour les usages considérés dans la réglementation et en utilisant les coefficients de conversion d'énergie primaire à énergie finale de la RT 2012, ces bâtiments produisent plus d'énergie en un an qu'il n'en consomment.

Pour réaliser le bilan énergétique de l'îlot aux différentes échelles, nous nous basons sur des résultats de SED réalisée au pas de temps horaire sous COMETH (Haas et Corrales, 2014).

Pour les consommations des autres usages (i.e non RT), nous avons utilisé des valeurs forfaitaires issues du label BEPOS Effinergie de $70 \text{ kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$ pour les logements et de $30 \text{ kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$ pour l'établissement scolaire (effinergie, 2015). Or, pour effectuer un bilan énergétique exhaustif, nous devons disposer de consommations horaires. Nous utilisons donc les valeurs d'apports internes conventionnelles utilisées pour le calcul réglementaire pour répartir les consommations horaires des autres usages.

Les performances des bâtiments de l'îlot sont résumées dans le tableau 3.1.

TABLE 3.1 – Consommations et productions annuelles en énergie finale et énergie primaire pour les bâtiments de l’îlot

Usage	MI	LC7	LC25	Es
Énergie finale kWh _{EF} /(m ² .an)				
Chauffage	15,5	9,9	6,8	23,3
ECS	4,9	6,7	6,4	0,7
Eclairage	1,8	1,6	1,6	1,8
Auxiliaire de ventilation	3,8	1,2	0,7	4,7
Auxiliaire de distribution	0,3	0	0	0,3
Autres usages	27,1	27,1	27,1	11,6
Production photovoltaïque	25,2	50,6	14,1	32,4
Énergie primaire kWh _{EP} /(m ² .an)				
Chauffage	15,5	25,6	6,8	23,3
ECS	12,8	17,2	16,6	1,8
Eclairage	4,6	4,2	4,1	4,7
Auxiliaire de ventilation	9,7	3,2	1,8	12,2
Auxiliaire de distribution	0,6	0	0	0,8
Autres usages	70	70	70	30
Production photovoltaïque	65,1	130,6	36,4	83,5
Total (Consommation - Production)	48,7	-10,4	63	-10,7

Nous nous intéressons plus particulièrement au calcul du bilan électrique à l’échelle de l’îlot et de chaque bâtiment, car c’est pour ce vecteur énergétique que la question de prise en compte de la mutualisation se pose.

D’après les études de la section précédente, nous effectuons les bilans énergétiques des différentes échelles spatiales au pas de temps horaire et nous agrégeons les résultats sur l’année.

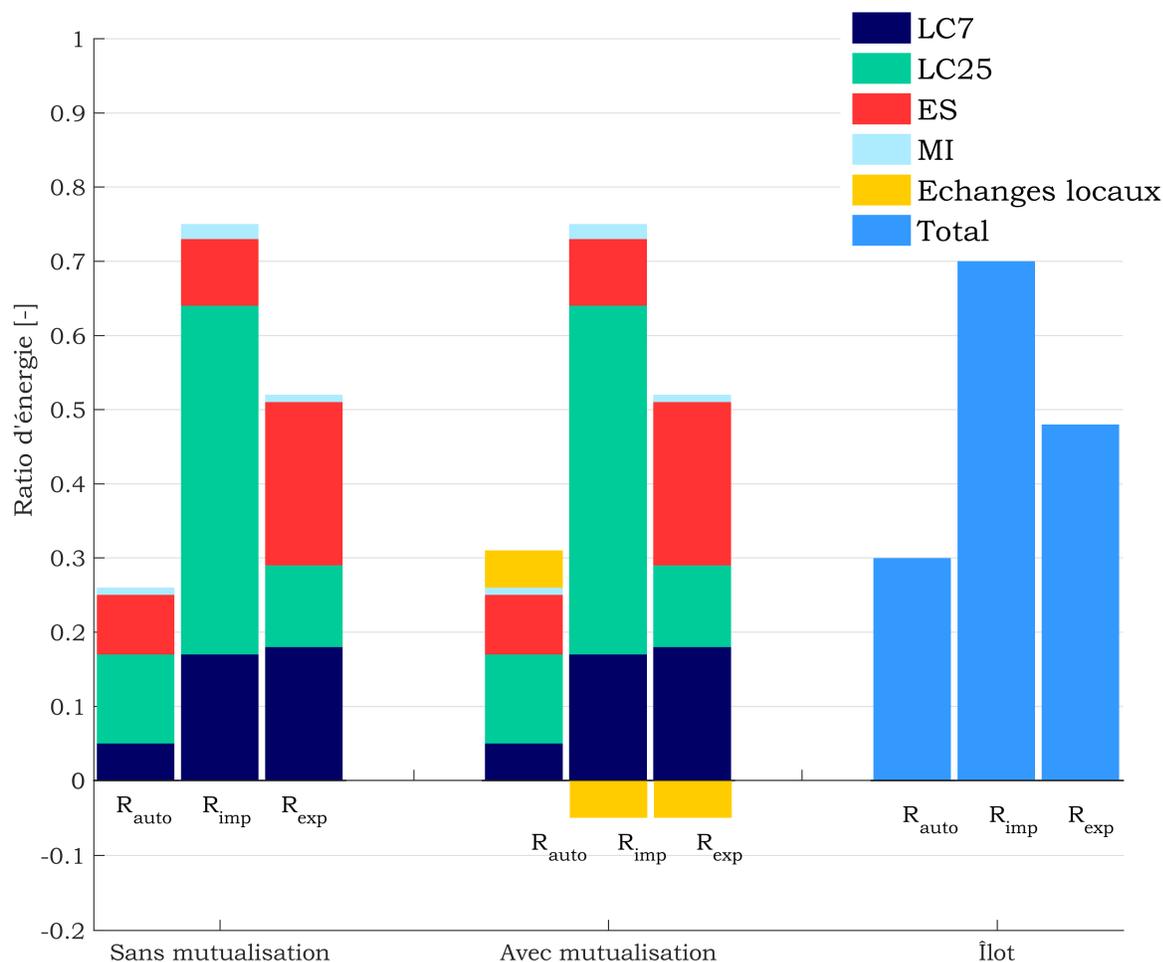


FIGURE 3.15 – Bilan électrique en fonction du périmètre de calcul pour un îlot constitué de deux immeubles de logements collectifs (LC7 et LC25), d'une école primaire (EP) et d'une maison individuelle (MI), tous équipés de panneaux photovoltaïques

La figure 3.15 présente les résultats des bilans import-export électrique de l'îlot en fonction des différents périmètres de calculs définis précédemment.

L'électricité consommée localement représente 5 % de la demande électrique de l'îlot. La prise en compte de ces échanges (bilan énergétique avec prise en compte de la mutualisation) permet d'obtenir le même bilan électrique en le réalisant bâtiment par bâtiment qu'à l'échelle globale de l'îlot. Avec le bilan réalisé sans prise en compte de la mutualisation, l'énergie auto-consommée est sous-estimée de 5 % par rapport au bilan de l'îlot ; l'énergie importée et exportée sont, elles, sur-estimées de 5 % par rapport au bilan de l'îlot.

Là encore, ces différences doivent être confrontées aux incertitudes du calcul des impacts environnementaux du contributeur énergie. Le principe de modularité ne s'applique que pour l'ACV. Ainsi, nous verrons que selon la méthodologie choisie tous les bilans restent intéressants.

3.3.3 Conclusions

Dans cette section, nous avons vu que l'extension spatiale de la performance oblige à prendre en considération non seulement le bâtiment mais également ceux qui l'entourent. Il existe alors plusieurs manières pour calculer le bilan énergétique de l'îlot et donc différents résultats pour le bilan import-export. Pour le cas d'étude présenté ici, l'écart entre le bilan énergétique réalisé pour l'îlot dans sa globalité et entre un bilan énergétique bâtiment par bâtiment sans prise en compte de la mutualisation des usages était faible, de l'ordre de 5 %. Le bilan énergétique bâtiment par bâtiment et avec prise en compte de la mutualisation était le même que celui pour l'îlot dans sa globalité.

Ces différences vont avoir une influence sur les méthodologies à utiliser pour réaliser le bilan environnemental du bâtiment, notamment sur la gestion de l'export d'énergie.

En effet, pour conserver le principe de modularité, il faut pouvoir additionner les impacts environnementaux de chaque bâtiment pour retrouver ceux de l'îlot (dans l'hypothèse où bien entendu nous ne considérons pas les impacts des infrastructures entre bâtiments i.e. routes, réseaux d'eau, etc.). Dans le chapitre 5, nous verrons quelles sont les frontières pour le bilan import-export d'un îlot et les méthodologies qui doivent être associées pour respecter du principe de modularité entre l'échelle bâtiment et l'échelle îlot.

3.4 Synthèse et conclusions

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux données de consommations et de productions énergétiques nécessaires au calcul des impacts environnementaux du contributeur énergie.

Pour des bâtiments non producteurs d'énergie, il est possible d'extraire facilement des résultats de SED ou du calcul réglementaire les consommations annuelles du bâtiment pour les utiliser ensuite en ACV.

Pour les bâtiments producteurs d'énergie, il faut distinguer les parts d'énergie auto-consommée, importée et exportée. Or, ce bilan énergétique est dépendant du pas de temps utilisé pour le réaliser.

Nous avons vu qu'un pas de temps annuel ne permet pas de prendre en compte la réalité des échanges entre le bâtiment et le réseau (surestimation de l'auto-consommation et sous-estimation de l'export et de l'import d'énergie).

Un pas de temps horaire conduit à une incertitude comprise entre 5 % et 10 % par rapport au cas de calcul le plus fin. Ainsi, le pas de temps horaire est aujourd'hui facilement implémentable (résultat de SED au pas de temps horaire) et conduit *a priori* à une incertitude raisonnable. Il faudra tester comment se traduit cette incertitude à l'échelle des résultats du calcul environnemental du contributeur énergie.

En outre, si la performance doit être évaluée à une échelle spatiale plus grande que le bâtiment, il faut prendre en compte les potentielles interactions entre les bâtiments.

Nous avons alors montré qu'il existe plusieurs manières de réaliser le bilan énergétique d'un îlot producteur d'énergie. Il faut donc tester ces différents bilans pour le calcul des impacts environnementaux du contributeur énergie pour savoir s'ils respectent le principe de modularité.

Dans le chapitre suivant, nous verrons quelles données environnementales pertinentes nous pouvons associer à ces données énergétiques pour le calcul des impacts environnementaux du contributeur énergie.

Chapitre 4

Données environnementales des vecteurs énergétiques et variations temporelles

Dans le chapitre précédent, nous nous sommes intéressés aux consommations et aux productions énergétiques nécessaires au calcul des impacts environnementaux du contributeur énergie. Particulièrement, nous avons vu qu'il existait une variation temporelle de ces données et nous avons étudié comment la prendre en compte.

Or, pour le calcul des impacts environnementaux du contributeur énergie, une fois les données de consommations disponibles, il faut les associer avec les données environnementales des vecteurs énergétiques utilisés dans le bâtiment. Nous l'avons vu au chapitre 1, les impacts environnementaux peuvent varier dans le temps. Ainsi, il faut déterminer si cette variation temporelle doit être considérée.

En outre, cette variation a différents horizons temporels. D'une part, nous avons observé des variations temporelles infra annuelles sur les impacts environnementaux du mix électrique (cf. figure 1.11). D'autre part, aujourd'hui, en ACV, la modélisation d'un bâtiment sur tout son cycle de vie se fait en utilisant des données environnementales représentant les mix énergétiques actuels. Ces derniers sont, pourtant, voués à changer comme l'indique les ambitions du projet de loi sur la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (2014). Dans ce chapitre, nous étudierons donc les variations à court et long termes des mix énergétiques, leur modélisation en ACV et leurs influences sur les résultats des impacts environnementaux du contributeur énergie.

Plus précisément, la section 4.1 précisera quels vecteurs énergétiques sont utilisés dans le bâtiment et s'il est possible de caractériser et d'étudier leurs caractéristiques temporelles.

La section 4.2 détaillera la modélisation de deux mix énergétiques et de leur variations à court terme, ainsi que leurs applications sur différents cas d'étude.

La section 4.3 s'intéressera aux variations à plus long terme des données environnementales sur les vecteurs énergétiques.

Enfin, la dernière section, 4.4, sera une synthèse des sections précédentes et rassemblera les conclusions de ce chapitre tout en les reliant à celles du chapitre précédent.

4.1 Types et caractéristiques des vecteurs énergétiques utilisés dans le bâtiment

Tout d'abord, il apparaît nécessaire de faire un point sur les énergies utilisées dans le bâtiment : quelles sont-elles et quelles sont leurs principales caractéristiques ? Cela permettra de déterminer les points importants à prendre en considération pour la création/sélection de leurs données environnementales.

En France, la répartition des énergies utilisées dans le secteur du bâtiment (tous usages confondus) est la suivante :

- 37 % d'électricité ;
- 32 % de gaz ;
- 16 % de pétrole ;
- 15 % d'énergies renouvelables et de déchets ;
- moins de 1 % de charbon (ADEME, 2013).

Pour le résidentiel, cette répartition peut-être affinée comme le présente la figure 4.1.

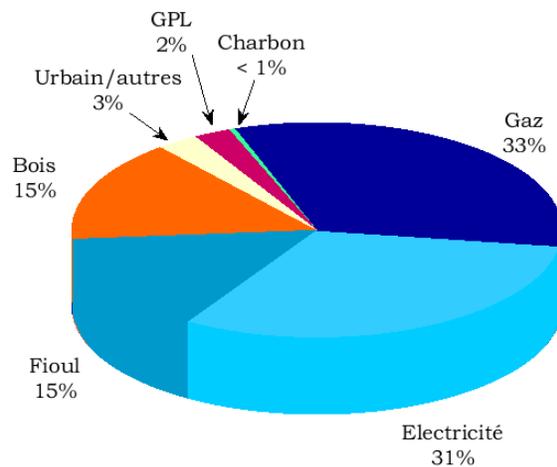


FIGURE 4.1 – Répartition des énergies utilisées par le résidentiel en France en 2012 (ADEME, 2013)

L'électricité est caractérisée par le nécessaire équilibre entre l'offre et la demande du réseau car il est difficile de stocker massivement de l'électricité. Cela se traduit par une production variable au cours du temps. Cette variabilité est obtenue en utilisant différents moyens de production (centrales nucléaire, au fioul, au gaz, hydraulique, etc.) ; elle résulte en une variabilité des impacts de la production électrique en fonction du temps (Marignac *et al.*, 2010).

Concernant le gaz naturel consommé en France, la majorité des impacts environnementaux a lieu lors de la phase de combustion (Riva *et al.*, 2006). Les quantités de gaz consommés sont six fois plus importantes en hiver qu'en été. Le stockage du gaz naturel permet d'assurer un approvisionnement continu (volume utile du stock de 11,7 milliards de mètre cube). Cependant, la variabilité des sources d'approvisionnement entraîne une variabilité des impacts environnementaux d'un mètre cube de gaz naturel dans le temps (Cadin, 2014).

Le fioul est plus utilisé en milieu rural et est le plus souvent stocké dans des cuves individuelles. Ainsi, même si la consommation de fioul est plus importante en hiver (Leherpeur, 2009), il est difficile de la prendre en compte : le stockage individuel effaçant la variabilité temporelle de la consommation. Par ailleurs, il existe différents distributeurs de fioul, pour la plupart des PME, rendant difficile le traçage des sources d'approvisionnement.

Concernant les énergies renouvelables, c'est avant tout le bois qui est utilisé et principalement pour le chauffage. Cette ressource est caractérisée par une utilisation locale et individuelle. Il est alors difficile de déduire une variabilité temporelle de la production ou de l'approvisionnement.

Dans les sections suivantes, nous focaliserons nos analyses sur les vecteurs électrique et gazier car ils représentent la majorité de l'énergie consommée dans les bâtiments en France. Par ailleurs, contrairement aux autres vecteurs énergétiques, des sources de données existent à l'échelle nationale pour caractériser leurs variabilités.

Dans la suite de ce chapitre, l'appellation mix énergétique correspond :

- pour l'électricité, aux différentes sources énergétiques exploitées (nucléaire, charbon, etc.) ;
- pour le gaz, au panachage des sources d'approvisionnement.

4.2 Modélisation de mix énergétiques sur une base historique

4.2.1 Mix gazier

4.2.1.1 Modélisation des variations du mix gazier

Concernant le gaz naturel consommé en France comme nous l'avons souligné plus haut, les sources d'approvisionnement de gaz sont variables au cours du temps. Des données de l'office statistique de l'Union européenne, Eurostat (2015), permettent de reconstituer la variabilité des sources d'approvisionnement du gaz consommé en France. Ces données sur la production, l'exportation et l'importation de gaz naturel à l'échelle Française sont disponibles pour les années 2008 à 2013 au niveau mensuel et il est possible de reconstituer un mix gazier français mensuel. A titre d'exemple, la répartition du mix sur l'année 2013 est présentée sur la figure 4.2 et mensuellement sur la figure 4.3.

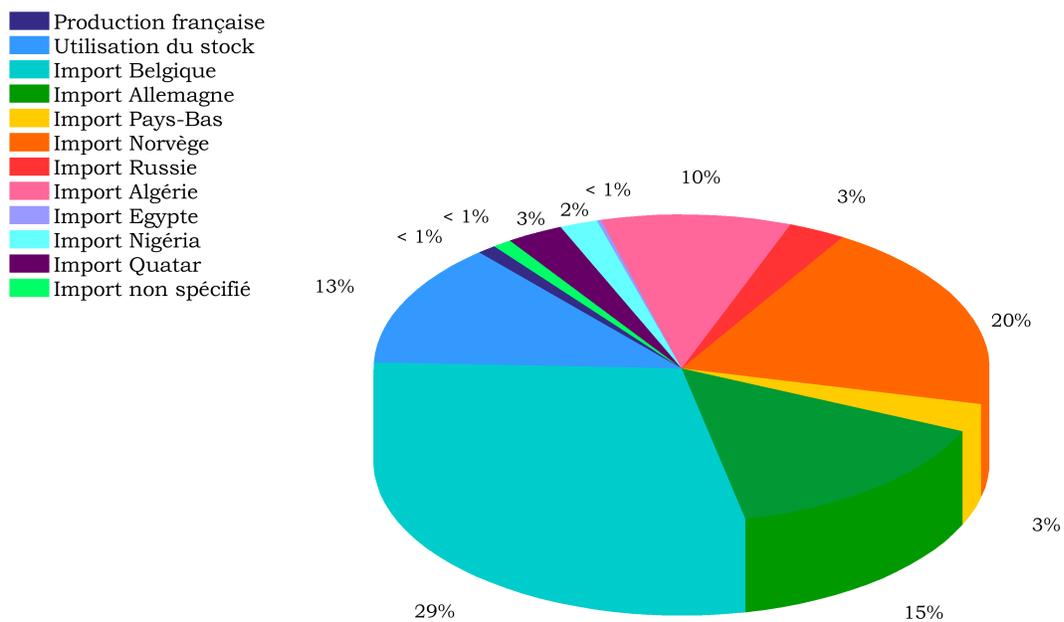


FIGURE 4.2 – Approvisionnement annuel en gaz naturel en France en 2013 (Eurostat, 2015)

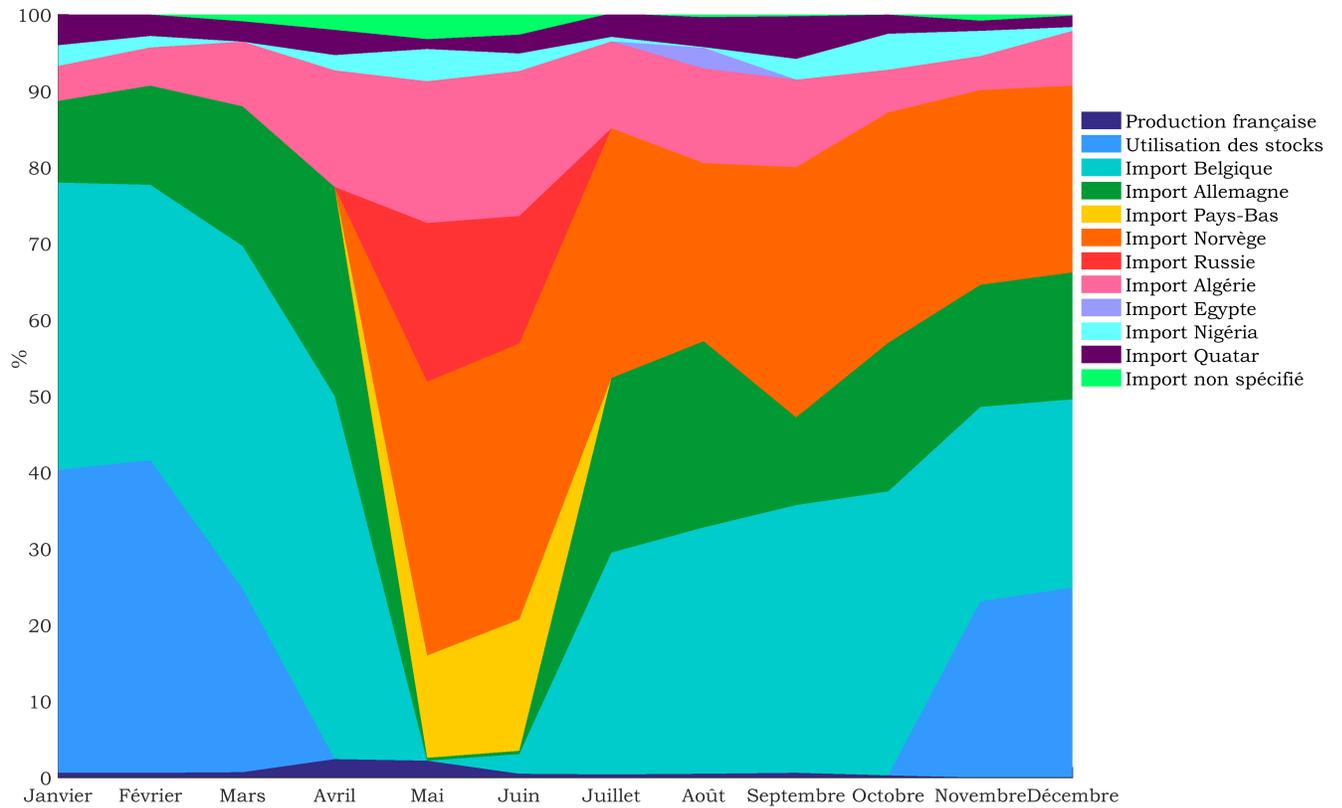


FIGURE 4.3 – Approvisionnement mensuel en gaz naturel en France en 2013 (Eurostat, 2015)

En couplant ces données avec les impacts unitaires liés aux différentes sources d’approvisionnement, nous avons reconstitué l’évolution mensuelle des impacts environnementaux du mètre cube de gaz consommé en France. Les données environnementales des sources d’approvisionnement sont issues de la base de données ecoinvent v3.1 et sont référencées et comparées dans l’annexe B.1.

Pour les stocks, une approximation a été faite en considérant la donnée du gaz naturel français car nous pourrions également considérer que celui-ci est le résultat du stock constitué les années précédentes et ainsi utiliser ces données pour détailler la provenance du gaz naturel stocké.

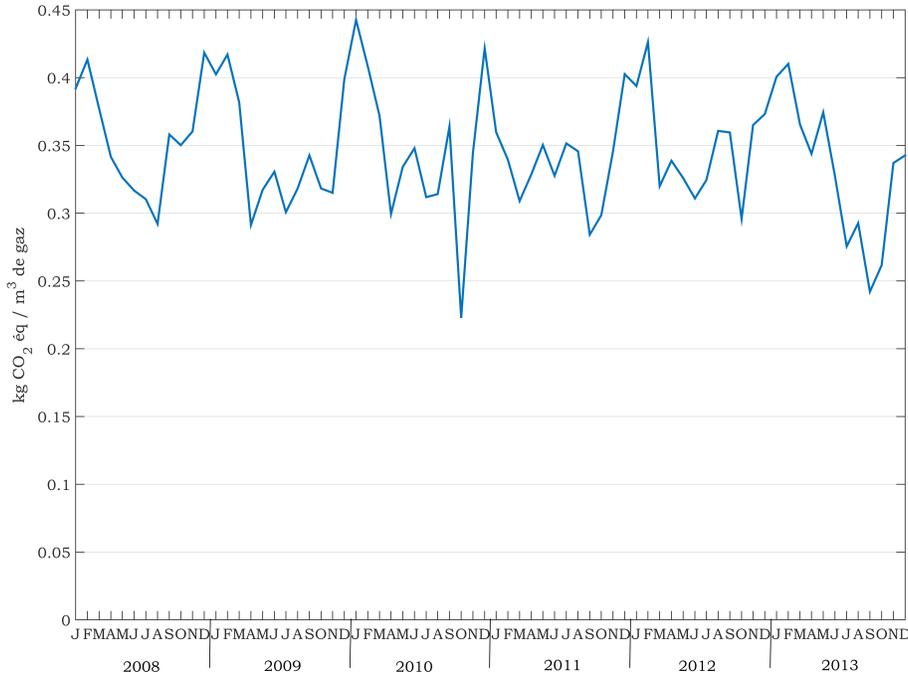


FIGURE 4.4 – Variabilité mensuelle de l’impact sur le changement climatique d’un mètre cube de gaz en France entre 2008 et 2013

Les potentiels impacts de la mise à disposition d’un mètre cube de gaz ont été calculés pour chaque mois pour les indicateurs de la norme EN 15978. A titre d’exemple, la figure 4.4 présente la variabilité mensuelle de la mise à disposition d’un mètre cube de gaz pour l’indicateur changement climatique. L’impact est élevé pendant les mois d’hiver (ceux où le gaz est utilisé pour le chauffage) et plus faible pendant les mois d’été. Par ailleurs, la figure 4.5 met en exergue le fait que la variation mensuelle de l’impact sur le changement climatique est faible par rapport à celle de l’électricité, que nous allons étudier par la suite.

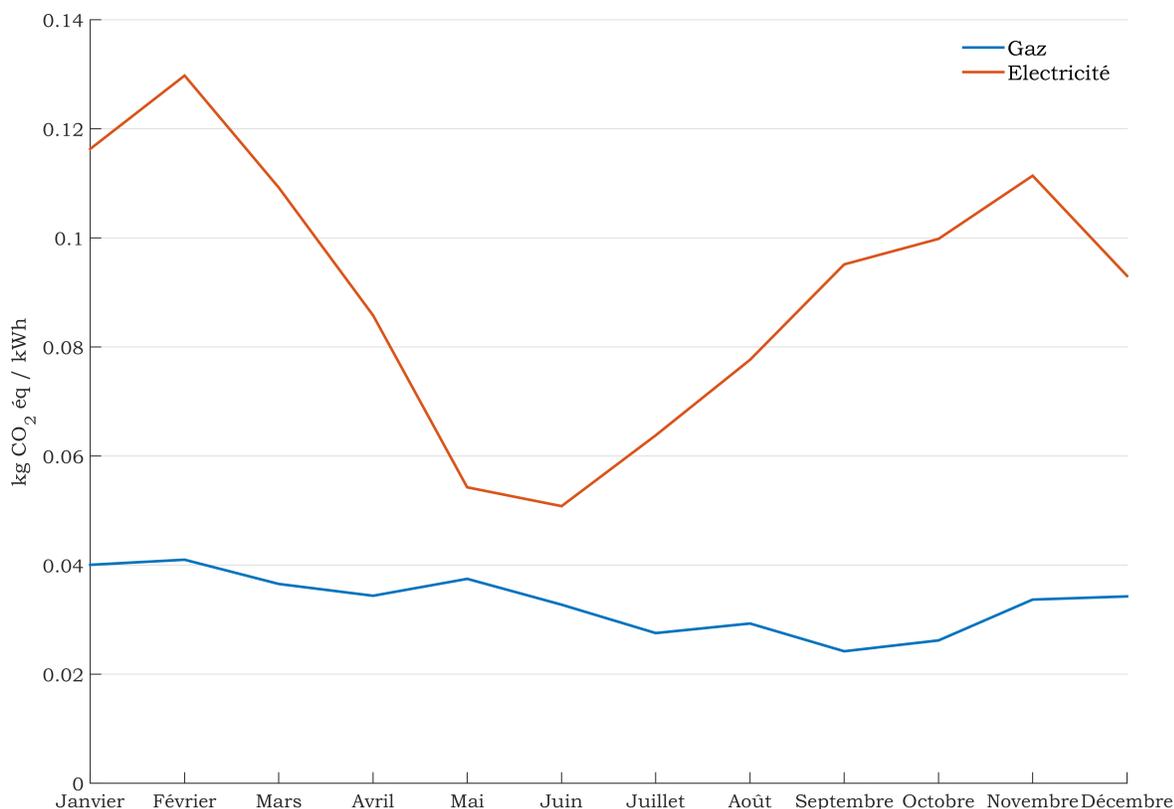


FIGURE 4.5 – Variations mensuelles comparées de l’impact sur le changement climatique de la mise à disposition d’un kilowattheure de gaz et d’électricité selon nos modélisations en 2013 en France

Enfin, il faut relativiser ces variations des impacts environnementaux car une grande part des impacts pour le gaz naturel sont situés lors de la phase de combustion chez le client. La figure 4.6 montre les contributeurs aux impacts de l’utilisation de gaz pour obtenir 1 MJ de chaleur grâce à une chaudière à condensation (< 100 kWh) (calculés à partir de la base de données ecoinvent v3 et sans prise en compte de la mise à disposition de la chaudière). Ainsi, pour le changement climatique, environ 80% des impacts ont lieu lors de la phase d’utilisation du gaz. Pour l’épuisement des ressources abiotiques - éléments, l’utilisation nette d’eau douce et les déchets radioactifs, plus de la moitié des impacts proviennent de l’électricité utilisée dans la chaudière. Pour les autres indicateurs (acidification, épuisement des ressources fossiles, déchets dangereux et non dangereux), c’est la mise à disposition du gaz qui est le principal contributeur.

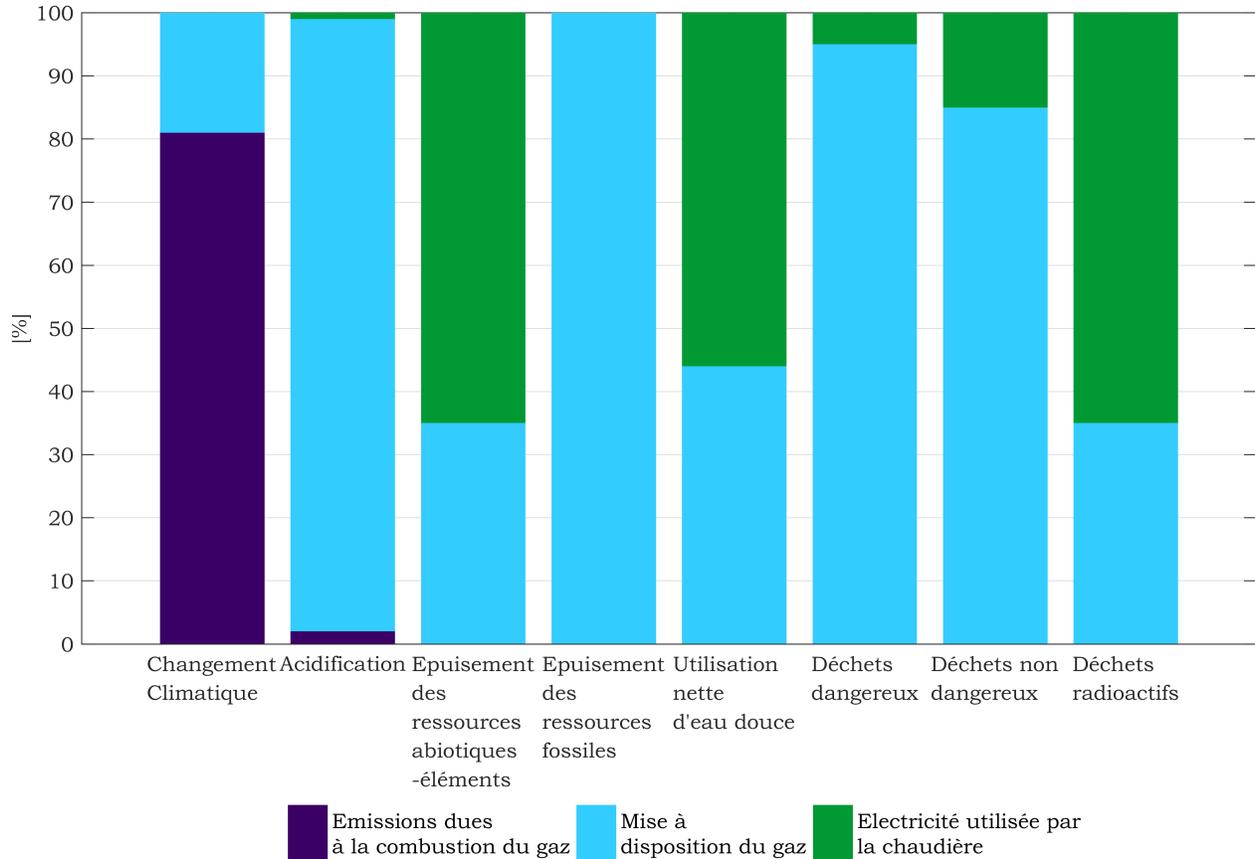


FIGURE 4.6 – Impacts de l'utilisation de gaz naturel pour obtenir 1 MJ de chaleur grâce à une chaudière à condensation en Europe (calculés à partir de la base de données ecoinvent v3 et sans prise en compte de la mise à disposition de la chaudière)

4.2.1.2 Applications à des bâtiments neufs utilisant du gaz

Dans cette section, nous allons comparer l'utilisation d'un mix gazier mensuel à celui d'un mix gazier annuel.

Différents cas d'étude ont été retenus pour la comparaison (seuls les usages réglementaires sont pris en compte) :

- Un bâtiment de bureaux de 10479,7 m² ($SHON_{RT}$) équipé d'une pompe à chaleur gaz pour le chauffage et le refroidissement ;
- Une maison individuelle de 180 m² ($SHON_{RT}$) équipée d'un chauffe-eau solaire avec appoint gaz ;
- Un immeuble de logements collectifs de 2408,4 m² ($SHON_{RT}$) équipé d'un système de chauffe-eau solaire collectif avec appoint gaz individualisé
- Un commerce de 3595,9 m² ($SHON_{RT}$) d'eau chaude sanitaire gaz

Les consommations mensuelles pour ces quatre typologies de bâtiments ont été calculées via COMETH (Haas et Corrales, 2014). Elles ont été simulées grâce à une météo de référence (celle de la RT 2012, obtenue à partir de mesures effectuées entre 1994 et 2008) et ne

correspondent donc pas aux consommations d’une année précise. Le coefficient de conversion adopté pour le passage entre un mètre cube de gaz et un kilowattheure est de 10 (PCI moyen) (Leherpeur, 2009). Ici nous nous intéressons seulement aux impacts de *la mise à disposition du gaz*.

TABLE 4.1 – Consommations mensuelles de gaz calculées pour les différents cas d’études

Mois	Consommation mensuelle (m ³ de gaz)			
	Bureau (Chauffage et refroidissement)	MI (Chauffage et ECS)	LC (Chauffage et ECS)	Commerce (Chauffage et ECS)
Janvier	3025	131	1940	4296
Février	1931	105	1629	2735
Mars	460	74	1139	3342
Avril	0	44	603	2487
Mai	353	28	196	1395
Juin	8236	26	179	583
Juillet	10236	24	186	26
Août	9020	19	188	13
Septembre	5527	24	175	13
Octobre	2404	28	323	15
Novembre	604	82	1400	779
Décembre	4011	121	1847	4593

Les différences induites par un calcul mensuel par rapport à un calcul annuel pour les indicateurs de la norme EN 15804 et pour les différents cas d’études sont représentées sur les figures 4.7 à 4.10. Les résultats sur des indicateurs complémentaires sont disponibles en annexe à la section B.2. Pour le bâtiment de bureaux, nous observons, pour la plupart des années, une diminution des impacts avec le calcul mensuel. En effet, la consommation de gaz est plus élevée en été pour les besoins de refroidissement et correspond globalement au moment où les impacts unitaires de la mise à disposition du gaz sont les plus bas. Pour les autres cas d’étude, nous notons une augmentation de la majorité des impacts lors de l’utilisation d’un calcul mensuel par rapport à un calcul annuel, et cela pour la plupart des années. En effet, les impacts sont plus élevés pendant les périodes de grande consommation (utilisation prépondérante du gaz pour le chauffage) et le calcul mensuel permet de prendre en compte ces variations contrairement au calcul annuel. Cependant, pour tous les cas d’études, les différences ne dépassent pas $\pm 18\%$. Or, aujourd’hui, au regard des incertitudes liées au calcul des impacts environnementaux (JRC, 2011b), ces différences ne sont actuellement pas significatives.

A l’heure actuelle, une granulométrie temporelle plus fine que l’année pour le mix gazier ne se justifie pas. Encore une fois, la variabilité des impacts du m³ de gaz doit être mise en perspective de la part importante des impacts de la phase de combustion du gaz en chaudière

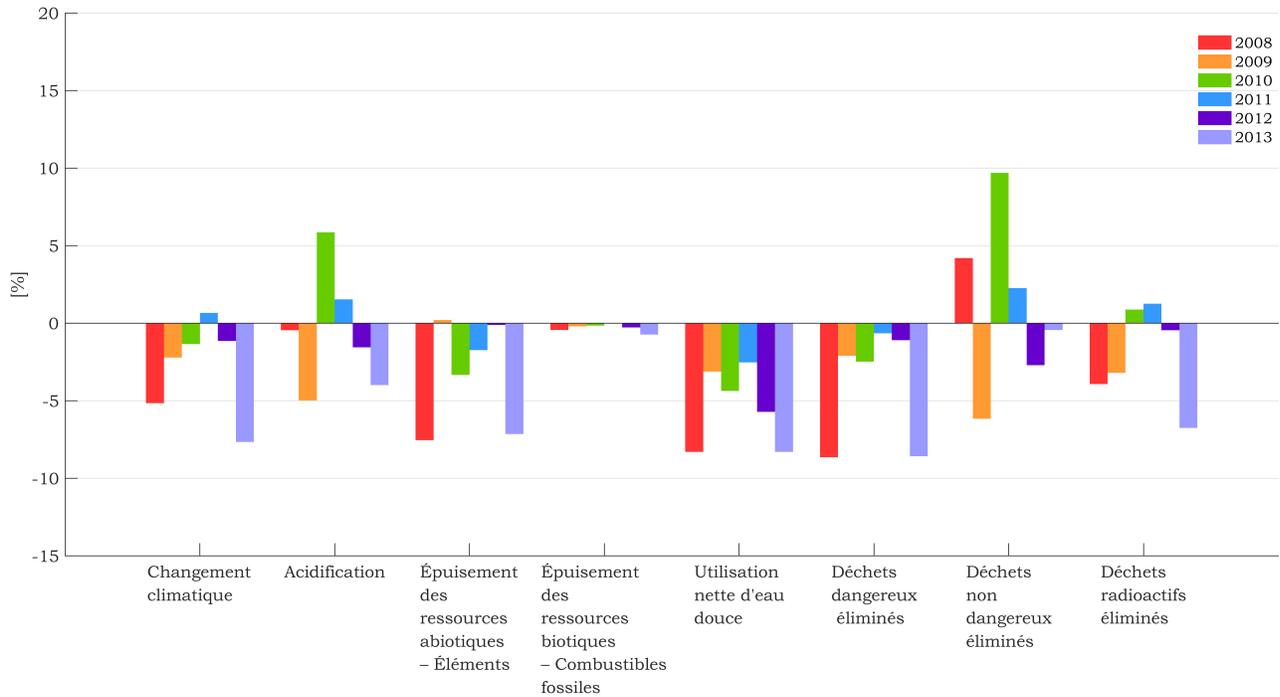


FIGURE 4.7 – Différences induites pour la mise à disposition de gaz par l'utilisation d'un mix mensuel par rapport à un mix annuel pour un bâtiment de bureaux

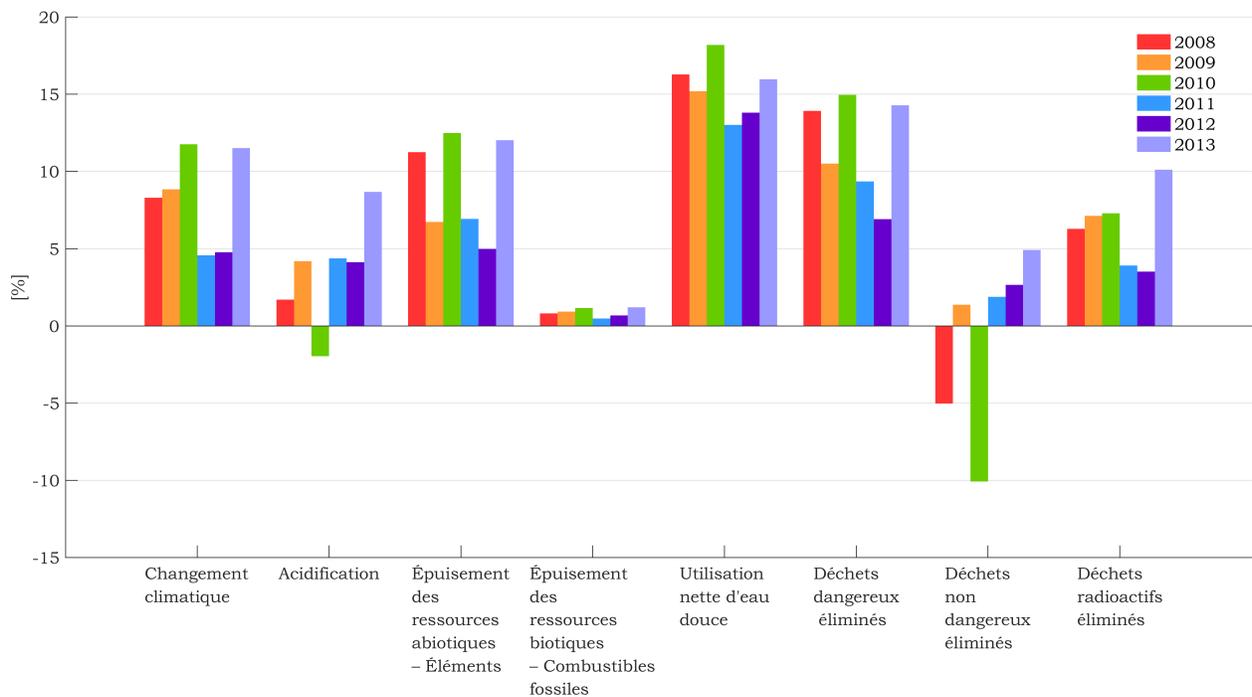


FIGURE 4.8 – Différences induites pour la mise à disposition de gaz par l'utilisation d'un mix mensuel par rapport à un mix annuel pour un bâtiment commercial

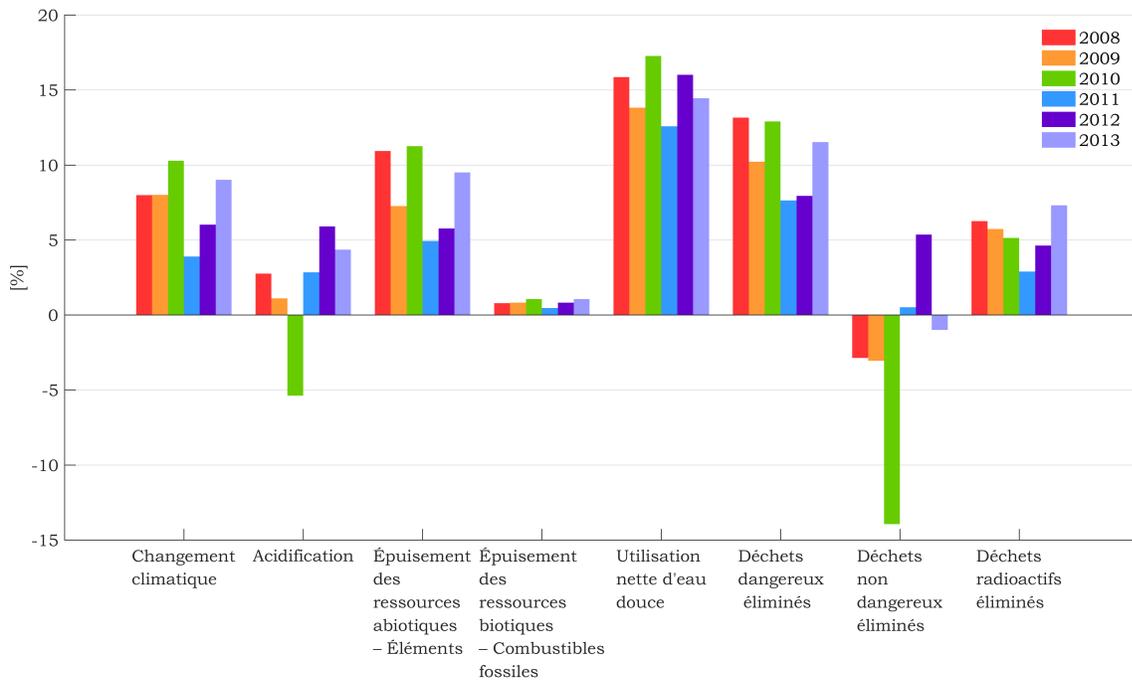


FIGURE 4.9 – Différences induites pour la mise à disposition de gaz par l'utilisation d'un mix mensuel par rapport à un mix annuel pour un bâtiment de logements collectifs

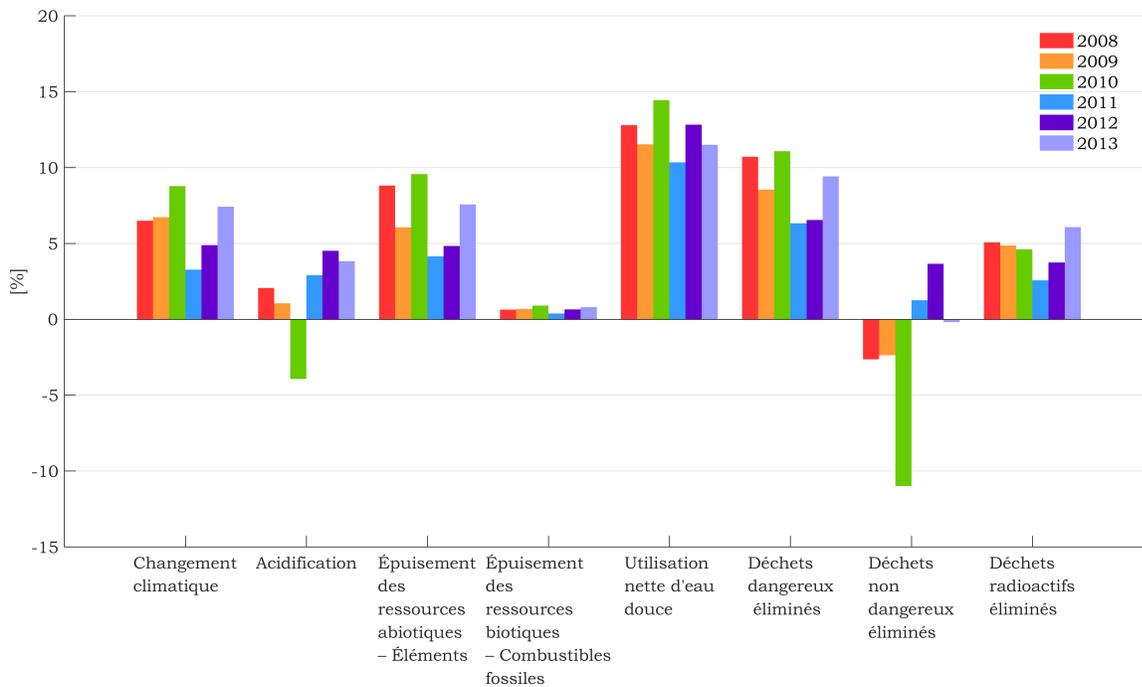


FIGURE 4.10 – Différences induites pour la mise à disposition de gaz par l'utilisation d'un mix mensuel par rapport à un mix annuel pour une maison individuelle

4.2.2 Mix électrique

4.2.2.1 Modélisation des variations du mix électrique

Plusieurs études ont prouvé que le mix électrique est une donnée clé en ACV (Forsberg et von Malmborg, 2002; Turconi *et al.*, 2013).

Par ailleurs, la question de la modélisation du mix électrique et son influence sur les résultats d'ACV ont également été discutés par Frischknecht et Stucki (2010) et Soimakallio *et al.* (2011). La première étude s'est concentrée sur les différences entre modélisation attributive, conséquentielle et décisionnelle du mix électrique. Selon les auteurs, la taille économique du projet étudié permet de trancher entre les trois approches. Pour l'évaluation environnementale d'un bâtiment, son poids économique est faible donc une approche attributionnelle apparaît appropriée. La seconde étude montre que, pour l'ACV attributionnelle, l'un des challenges reste la modélisation temporelle du mix électrique ; doit-elle être instantanée, saisonnière ou annuelle ?

En Belgique, Messagie *et al.* (2014) a utilisé les données horaires des différents producteurs d'électricité de Belgique pour reconstituer le mix électrique horaire de 2011 et trouver la variabilité temporelle des émissions de GES.

Herfray (2011) a, quant à lui, proposé une modélisation horaire du mix électrique basée sur une régression sur la température extérieure. Le mix électrique utilisé pour le calcul des impacts environnementaux utilise alors les mêmes données météorologiques que celles utilisées pour calculer les besoins énergétiques.

Cependant, la température n'est pas la seule variable influençant la composition du mix électrique ; le prix des énergies, les immobilisations des moyens de production, etc. sont des éléments non négligeables dans le choix des centrales utilisées pour produire l'électricité en France (Marignac *et al.*, 2010). Outre cette limite dans la modélisation du mix, les résultats n'appuyaient pas la nécessité d'avoir une modélisation horaire du mix électrique. En effet, sur le cas d'un quartier constitué de bâtiments neufs équipés de panneaux photovoltaïques, les différences observées entre l'utilisation d'un mix moyen annuel et un mix horaire étaient faibles.

Ici, nous proposons de reconstituer le mix électrique français sur différentes années écoulées, au pas de temps le plus fin, en se basant sur des données fournies par le gestionnaire du réseau électrique, RTE (Réseau de Transport d'Electricité). Ainsi, nous pourrions tester sur différents cas si la variation temporelle du mix électrique doit être considérée pour l'ACV bâtiment et éventuellement justifier l'utilisation d'un mix générique caractérisé temporellement.

RTE publie différents types de données qui permettent de réaliser une évaluation environnementale temporelle du mix électrique. Ces deux sources de données sont :

- La production réalisée par le parc de référence¹
- L'application Eco2mix²

1. http://clients.rte-france.com/lang/fr/visiteurs/vie/prod/realisation_production.jsp

2. <http://www.rte-france.com/fr/developpement-durable/eco2mix>

La production réalisée par le parc de référence ne prend en compte que les moyens de production centralisée ayant une puissance supérieure à 20 MW soit environ 90 % du parc de production. Il manque notamment les moyens de production raccordés en moyenne et basse tension (solaire, éolien, cogénération, etc.) La résolution des données est au niveau horaire et celles-ci sont disponibles entre 2007 et 2014.

Via son application Eco2mix, RTE publie en temps réel les données de production par filière de l'intégralité du parc. Ces données sont disponibles toutes les 30 minutes à partir de 2012. La résolution par filière est plus importante dans cette base de données :

- la filière gaz est décomposée comme suit : Turbine à combustion, cogénération, cycle combiné à gaz et autres gaz ;
- la filière fioul est décomposée de la manière suivante : Turbine à combustion, cogénération, et autres fiouls ;
- la filière hydraulique est décomposée en centrales au fil de l'eau et écluses, lacs et STEP (Station de Transfert par Pompage)/Turbinage ;
- la catégorie EnR Thermique, non présente dans la 1^{ère} base de donnée, se décompose en : déchets, biomasse et biogaz ;
- les filières éolienne et solaire sont également disponibles.

Dans les deux bases de données, les échanges physiques avec les pays voisins sont disponibles sous la forme d'un solde "import-export". Une valeur négative indique un solde exportateur, une valeur positive indique un solde importateur. Il existe donc une source d'erreur liée à l'impossibilité de différencier les imports des exports d'électricité d'une part avec la somme des six pays frontaliers, et d'autre part avec chacun de ces pays, à chaque pas de temps.

Dans le reste de ce chapitre, nous utiliserons en priorité les données Eco2mix pour la création d'un mix électrique horaire. Les données du parc de référence ne seront utilisées que pour des cas d'études dont les mesures ou les simulations ont été effectuées avant 2012.

Les données environnementales que nous avons associées à chaque moyen de production pour la modélisation du mix électrique sont issues de la base de données ecoinvent v3.1 (allocation par défaut) et sont référencées dans l'annexe B.3.

Par ailleurs, nous avons besoin des impacts environnementaux d'un kilowattheure d'électricité chez le consommateur. Les pertes sur le réseau et les impacts de ce dernier sont également pris en compte dans notre modélisation.

Comme indiqué par RTE et ERDF, nous considérons 2,5 % de pertes sur le réseau haute tension et 6 % sur le réseau de distribution (moyenne et basse tension) (RTE, 2012; ERDF, 2015). Il y a des limites à l'utilisation d'un taux de pertes fixes car celles-ci sont variables dans le temps. Par ailleurs, nous ne faisons pas de distinction des pertes entre les différentes filières. Or, certains moyens de production peuvent être directement branchés en moyenne ou basse tension.

Les impacts liés aux réseaux de transport et de distribution sont approximés avec les données relatives au transport et à la distribution de la donnée ecoinvent v3.1 "Electricity, low voltage FR| market for, Alloc, Def,U". Ils prennent en compte :

- les lignes hautes, moyennes et basses tensions ;

— les émissions de polluants dans l'air (SF_6 , N_2O , O_3).

Les impacts horaires du mix électrique sont calculés pour les indicateurs de la norme EN 15978 pour les années disponibles (2012 à 2014 pour Eco2mix et 2007 à 2014 pour les données du parc de référence).

A titre d'information, la figure 4.11 illustre la variabilité temporelle de l'impact sur le changement climatique du mix électrique français et la figure 4.12 illustre cette variabilité pour différentes années. Entre 2012 et 2013, les médianes sont quasiment identiques. La plage totale de variabilité est plus étendue pour 2012 avec des valeurs extrêmes alors qu'en 2013, c'est la plage de variabilité à 50 % qui est plus importante. En 2014, nous observons une baisse de la médiane et de la variabilité de l'impact.

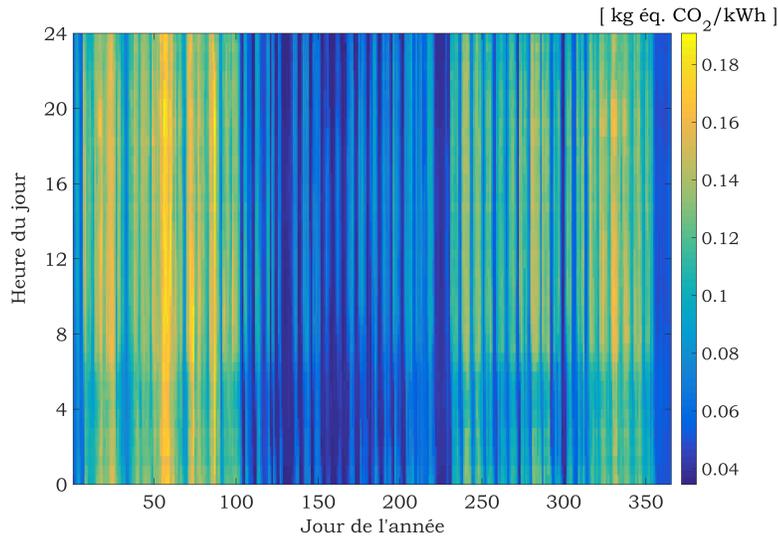


FIGURE 4.11 – Variations horaire et journalière de l'impact sur le changement climatique de la mise à disposition d'un kilowattheure d'électricité en 2013 en France

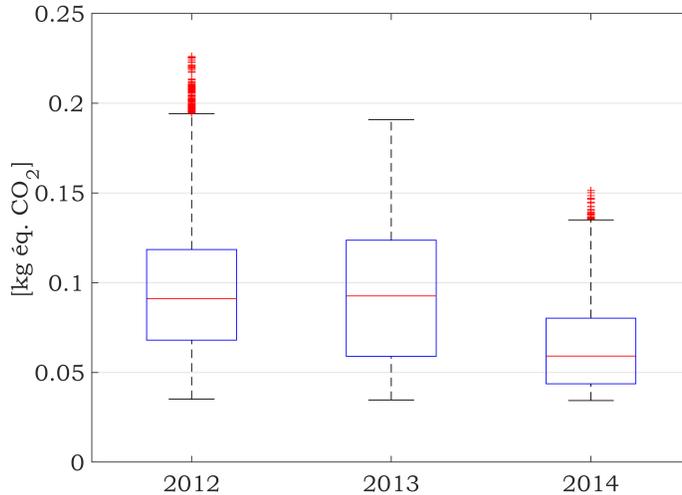


FIGURE 4.12 – Variabilité annuelle de l’impact sur le changement climatique de la mise à disposition d’un kilowattheure d’électricité en France entre 2012 et 2014

4.2.2.2 Applications à des bâtiments neufs utilisant de l’électricité

Dans cette étude, nous voulons tester l’intérêt d’utiliser une modélisation horaire (ou semi-horaire) pour le calcul des impacts environnementaux du mix électrique.

Pour cela, nous disposons d’un troisième lot de courbes de charges électriques de bâtiments. Ces courbes de charge sont issues de mesures effectuées par le bureau d’étude Enertech entre 2008 et 2013 sur neuf maisons individuelles, cinq bâtiments de bureaux, une crèche, deux écoles et un hôtel. Le périmètre des mesures comprend tous les usages électriques du bâtiment (usages réglementaires et usages spécifiques). Une description succincte des ces courbes de charge est disponible dans le tableau 4.2. Une étude plus détaillée est disponible à l’annexe B.4.

La figure 4.13 illustre les différences induites par un calcul horaire par rapport à un calcul annuel pour le calcul des impacts environnementaux de la consommation d’électricité. Quelque soient les indicateurs et les cas, les différences entre le calcul horaire et le calcul annuel sont faibles (inférieurs à 5 %).

Ainsi, il est donc raisonnable d’utiliser un mix annuel plutôt qu’un mix horaire pour ces bâtiments.

Il faut cependant noter que ces conclusions sont valables pour des bâtiments neufs. En effet, les équipements et systèmes sont plutôt récents.

TABLE 4.2 – Description des 18 bâtiments du lot de courbes de charge n°3

Cas	Typologie	Année de mesures	SHON [m ²]	Consommation [kWh _{EP} / (m ² .an)]
1	École	2010 - 2011	710	58
2	École	2012 - 2013	1305	52
3	Crèche	2009 - 2010	1847	76
4	Bureau	2010 - 2011	1685	142
5	Bureau	2010 - 2011	4000	111
6	Bureau	2012 - 2013	1741	113
7	Bureau	2012 - 2013	4514	102
8	Hôtel	2012 - 2013	6617	208
9	Bureau	2008 - 2009	3181	76
10	Maison individuelle	2009 - 2010	139	200
11	Maison individuelle	2010 - 2011	139	182
12	Maison individuelle	2011 - 2012	139	257
13	Maison individuelle	2011 - 2012	139	158
14	Maison individuelle	2011 - 2012	139	177
15	Maison individuelle	2011 - 2012	139	132
16	Maison individuelle	2011 - 2012	139	135
17	Maison individuelle	2011 - 2012	139	150
18	Maison individuelle	2011 - 2012	139	87

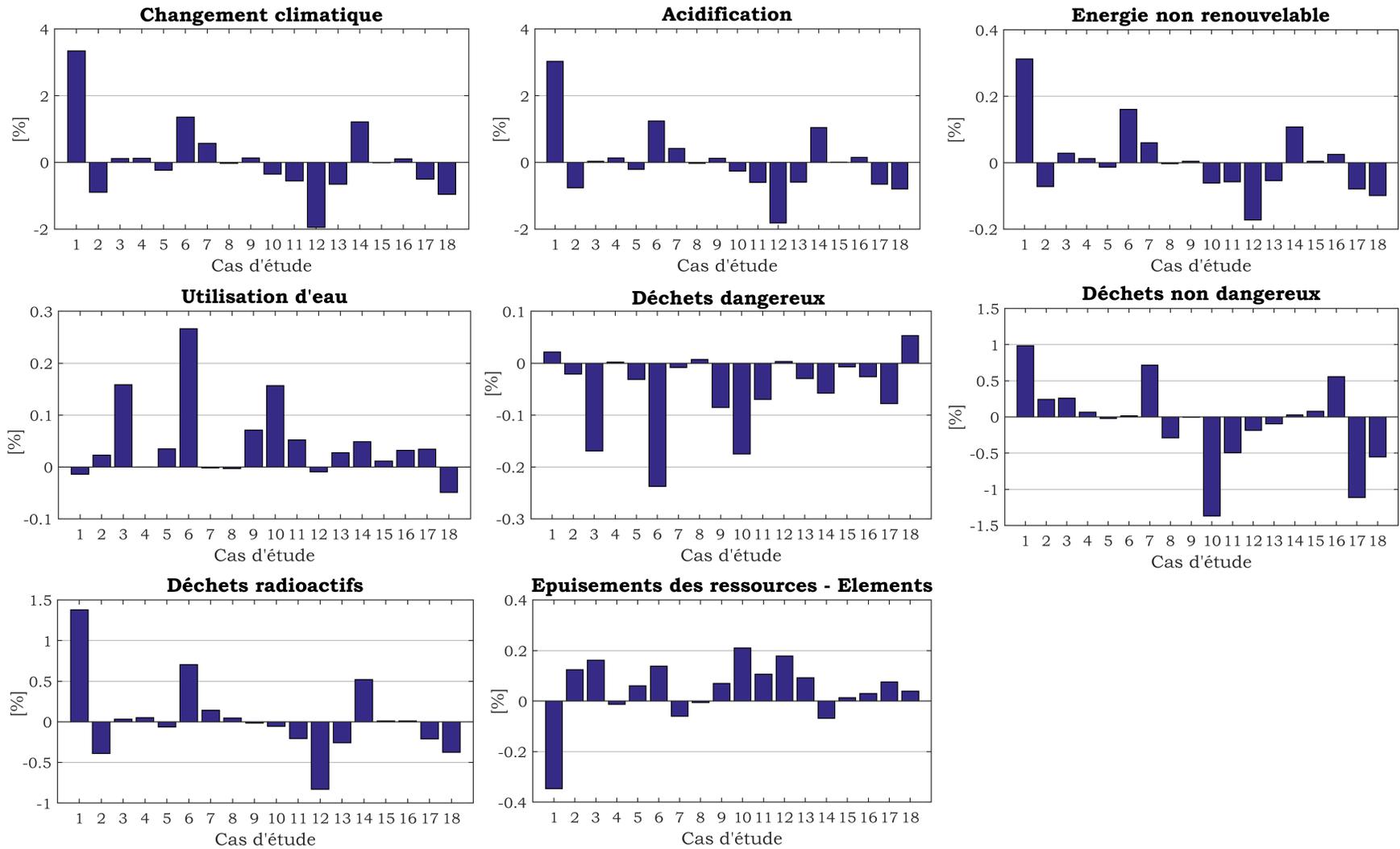


FIGURE 4.13 – Différences induites par l'utilisation d'un mix électrique horaire par rapport à un mix annuel

4.2.2.3 Applications aux problématiques d’effacement et de smart-grid

Dans cette partie, nous nous intéressons à l’utilisation d’un mix électrique caractérisé temporellement pour l’évaluation d’un maillage intelligent du réseau à l’échelle du bâtiment.

Pour cela, un logement collectif de 100 m² est modélisé avec les conditions météorologiques de 2012 à Lyon sous SIMBAD (bibliothèque de composants de génie climatique pour l’environnement MATLAB/Simulink qui permet de réaliser des simulations dynamiques et de tester des régulateurs). Ce bâtiment est équipé de radiateurs électriques, sa température de consigne est de 21°C. Deux modélisations sont effectuées :

- l’une correspondant aux exigences de la RT88 avec une consommation annuelle de 153 kWh_{EF}/(m².an) pour le chauffage ;
- et l’autre aux exigences de la RT2012 avec une consommation annuelle de 37 kWh_{EF}/(m².an) pour le chauffage.

Vingt-deux jours par an (les 22 jours de pointe, EJP, défini par EDF), un signal est envoyé au bâtiment pour que celui-ci effectue une surchauffe de 1°C pendant deux heures (de 16h à 18h) puis coupe le chauffage de 18h à 20h. Ainsi, la consommation due au chauffage est décalée.

Nous comparons donc les impacts en utilisant un mix électrique annuel et un mix électrique semi-horaire (données toutes les 30 minutes) pour les deux configurations de bâtiments, et avec ou sans effacement (cf. tableau 4.3 et en annexes le tableau B.4).

TABLE 4.3 – Résultats sur les impacts environnementaux pour les deux configurations du bâtiment et les différents calculs (mix annuel vs. mix semi-horaire)

Indicateurs environnementaux calculés sur une année type	RT 1988				RT 2012			
	Calcul annuel		Calcul semi-horaire		Calcul annuel		Calcul semi-horaire	
	Sans effacement	Avec effacement	Sans effacement	Avec effacement	Sans effacement	Avec effacement	Sans effacement	Avec effacement
Changement climatique (t CO ₂ éq)	1,49	1,49	1,82	1,82	0,36	0,36	0,46	0,46
Acidification (kg SO ₂ éq)	7,94	7,93	8,92	8,89	1,92	1,92	2,22	2,22
Épuisement des ressources abiotiques -Éléments (kg Sb éq)	0,02	0,02	0,03	0,03	0,01	0,01	0,007	0,007
Épuisement des ressources fossiles (MJ)	17924	17888	22339	22264	4343	4341	5664	5657
Utilisation nette d'eau douce (m ³)	85	85	84	84	21	21	20	20
Déchets dangereux éliminés (kg)	4,21	4,11	5,20	5,18	1,00	1,00	1,36	1,36
Déchets non dangereux éliminés (kg)	767	766	802	800	186	186	196	196
Déchets radioactifs éliminés (kg)	2,47	2,47	2,43	2,43	0,60	0,60	0,59	0,59

Tout d'abord, nous nous devons de noter qu'*a priori* l'effacement n'aura que très peu, voir pas d'impacts sur le bilan environnemental du bâtiment. En effet, la quantité d'énergie effacée avec 22 jours est de 30 kWh_{EF} pour le bâtiment RT 88 et 1 kWh_{EF} pour le bâtiment RT 2012 (soit respectivement 20 % et 2.7 % de la consommation annuelle). Cet effacement n'est peut-être pas le plus pertinent mais est basé sur des signaux existants (jours EJP) et sur le refus d'une perte de confort pour l'utilisateur. D'autres solutions d'effacement pourrait consister à :

- Couper le chauffage du logement pendant la période de pointe (sans préchauffage) ;
- Abaisser la température de chauffe de 2°C pendant la période de pointe.

Cependant, ces dernières peuvent avoir plus de conséquences sur le confort de l'utilisateur.

De plus, cette analyse ne prend pas en compte les impacts environnementaux des éventuels équipements nécessaires à la gestion de l'effacement au niveau du réseau et du bâtiment. Ces impacts pourraient être largement supérieurs à ceux évités par l'effacement et l'amortissement d'un tel système serait alors très long, comme le montre par exemple van Dam *et al.* (2013) pour des systèmes de gestion de l'énergie dans une maison.

Les graphiques 4.14 et 4.15 représentent les variations de l'indicateur changement climatique sur cinq jours avec déclenchement du signal, pour les cas sans et avec effacement, pour les deux bâtiments.

Nous observons que l'appel de puissance supérieur pour le préchauffage (et pour le "réchauffage") se traduit également par un pic d'émissions de GES qui compense les émissions effacées quand le chauffage est coupé.

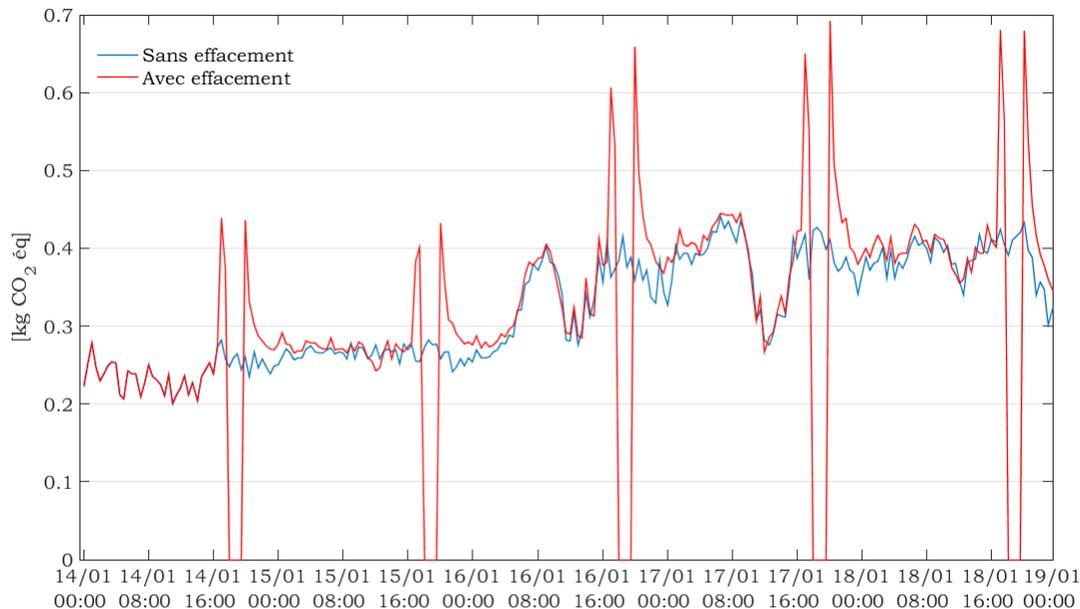


FIGURE 4.14 – Indicateur changement climatique pour le bâtiment RT1988 avec et sans effacement

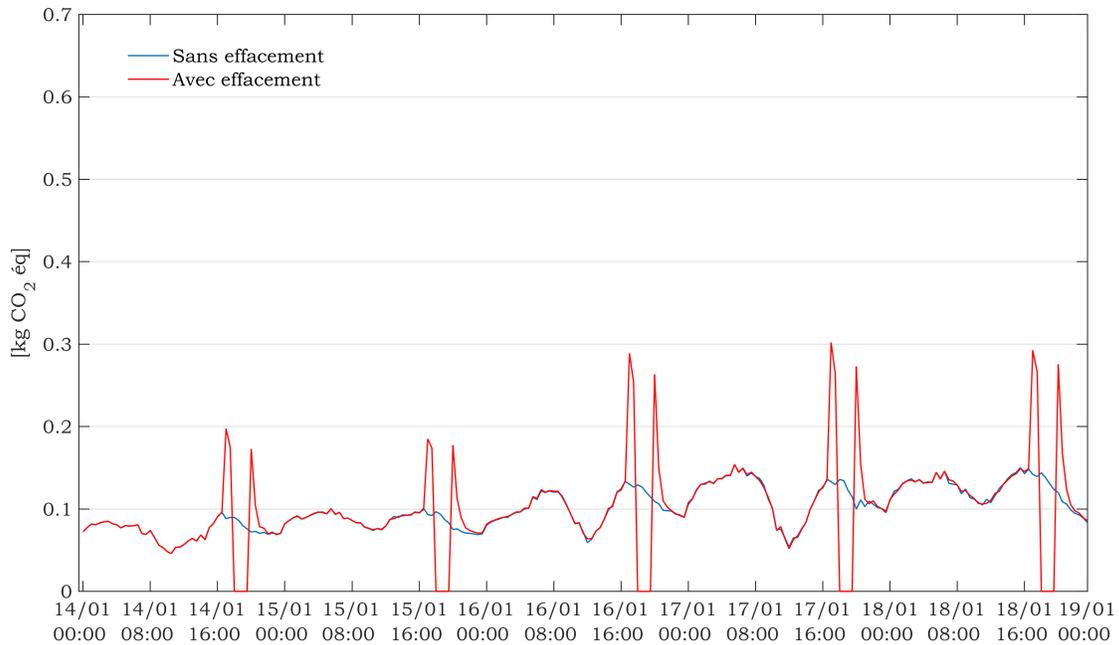


FIGURE 4.15 – Indicateur changement climatique pour le bâtiment RT2012 avec et sans effacement

Par ailleurs, en modélisant le mix électrique horaire sur la base des données fournies par RTE, nous faisons l’hypothèse que la modification de la consommation d’un bâtiment n’engendre qu’une modification de l’amplitude de la consommation nationale sans générer de modification du mix. Autrement dit, la modification mesurée sur l’impact environnemental est due à ce qu’on ne consomme pas. La prise en compte - à une plus grande échelle - du développement de certaines technologies comme l’effacement pourrait être pris en compte via une approche marginale et non pas avec l’approche moyenne utilisée ici (RTE et ADEME, 2007). L’approche marginale vise à comptabiliser l’impact d’une modification de consommation sur les moyens de production (par exemple, l’arrêt d’une centrale à gaz). Avec l’approche utilisée ici, la non-utilisation de certaines centrales due à l’effacement ne peut pas être capturée à l’échelle d’un bâtiment ni via des modélisations moyennes du mix électrique.

Comme précédemment, la comparaison des calculs réalisés avec un mix électrique annuel par rapport à un mix plus détaillé montre des différences notables pour le chauffage électrique : autour de 20 % pour le changement climatique, les déchets dangereux, l’utilisation de ressource fossiles et la formation d’ozone photochimique.

4.2.2.4 Applications aux bâtiments producteurs d'énergie

Dans cette section, nous reprenons les cas d'étude de la section 3.2 i.e. des maisons individuelles sans systèmes de chauffage, de refroidissement (ventilation comprise) ni de production eau chaude sanitaire électrique, mais équipées de panneaux photovoltaïques.

Pour calculer les impacts environnementaux liés à la production locale d'énergie en utilisant une approche ACV, il faut prendre en compte les impacts liés au cycle de vie de l'élément producteur d'électricité et utiliser des règles d'allocation de ces impacts en fonction de la part d'énergie exportée et la part d'énergie auto-consommée par le bâtiment, et les impacts liés à l'énergie issue du réseau. La question de ces différentes règles d'allocation et leurs conséquences ne sera pas discutée dans cette étude et l'attention se portera uniquement sur l'énergie importée du réseau et les impacts du choix de la granulométrie temporelle sur les indicateurs environnementaux liés à cet import. Nous allons considérer l'utilisation du mix électrique caractérisé temporellement défini plus haut pour la part importée de l'énergie. En d'autres termes, nous voulons tester l'intérêt d'utiliser une donnée environnementale inférieure à l'année pour le mix électrique dans le cas particulier de ces maisons équipées de panneaux photovoltaïques. La résolution temporelle mix électrique (i.e. semi-horaire, horaire, annuel...) peut être différente de celui du bilan énergétique import-export, précédemment étudié dans la section 3.2.

4.2.2.4.1 Méthodologie

Les bilans énergétiques obtenus pour les différents pas de temps considérés au 3.2 sont agrégés à une base de temps compatible avec celle de la donnée environnementale utilisée pour l'énergie importée du réseau.

Plus particulièrement, nous calculons :

- L'énergie importée du réseau agrégée au niveau annuel $E_{CdcImp}(an)$
- L'énergie importée du réseau agrégée au niveau horaire $E_{CdcImp}(h)$

Par la suite, ces consommations d'électricité sont associées à des données environnementales du mix électrique pour l'année 2012 respectivement au niveau annuel et horaire. Ici, ce n'est pas un mix générique qui a été utilisé du fait de sa non disponibilité au niveau horaire. Cependant, l'année 2012 a été une année proche de la normale en ce qui concerne les températures, les précipitations ou l'ensoleillement, ce qui limite l'influence des aléas climatiques sur le mix électrique (Météo-France, 2013). De plus, compte tenu du périmètre des logements étudiés (sans systèmes électriques pour le chauffage, le refroidissement ou l'eau chaude sanitaire), la variabilité aux conditions météorologiques de la demande en électricité serait *a priori* réduite.

Le tableau 5.2 résume les 3 principaux cas pour lesquels les résultats pour chaque association [logement ; cas PV], vont être présentés. Le premier cas [pas de temps pour le bilan import/export de une minute ou 10 minutes suivant la source (courbe de charge synthétique à une minute ou mesurée toutes les dix minutes), agrégation horaire et donnée environnementale horaire] correspond à l'évaluation la plus fine réalisable pour cette étude ; elle est utilisée comme référence. Le second cas [pas de temps horaire pour le calcul import/export, agrégation horaire et donnée environnementale horaire] correspond à l'évolution plausible des calculs actuels et le troisième cas [pas de temps horaire pour le calcul import/export,

agrégation annuelle et donnée environnementale annuelle] correspond à la pratique actuelle. Ce choix d'observations permet donc d'observer l'incertitude par rapport au cas de référence de l'approche actuelle et de sa possible évolution.

TABLE 4.4 – Choix d'observations des différents cas pour chaque binôme [logement-cas PV]

Pas de temps calcul import/export	Agrégation	Base de temps impacts environnementaux	
		Horaire	Annuelle
Référence : 1 ou 10 min	Horaire	Cas réf.	
Horaire	Horaire	Cas A	
Horaire	Annuelle		Cas B

4.2.2.4.2 Résultats

Référence temporelle de 10 minutes

Le tableau 4.5 (et le tableau B.5 en annexe) présente les incertitudes moyennes induites par les différentes méthodes de calcul. Pour nos 441 cas (9 configurations photovoltaïques pour chacun des 49 logements), nous avons calculé les impacts environnementaux de l'électricité importée du réseau. La référence correspond au calcul le plus fin possible : un calcul import/export réalisé à 10 minutes puis agrégé à l'heure et utilisant une donnée environnementale horaire pour le mix électrique. Le cas A correspond à un bilan import/export horaire associé à une donnée environnementale horaire pour le mix électrique. Le cas B correspond à un bilan import/export horaire agrégé au niveau annuel et associé à une donnée environnementale annuelle pour le mix électrique.

TABLE 4.5 – Lot N°1 : Incertitudes moyennes induites par les différentes méthodes de calcul

Indicateurs environnementaux	Référence	Cas A	Cas B
Changement climatique	100 %	95 %	91 %
Acidification	100 %	95 %	94 %
Épuisement des ressources abiotiques -Éléments	100 %	95 %	98 %
Épuisement des ressources fossiles	100 %	95 %	91 %
Utilisation nette d'eau douce	100 %	95 %	95 %
Déchets dangereux éliminés	100 %	95 %	94 %
Déchets non dangereux éliminés	100 %	95 %	95 %
Déchets radioactifs éliminés	100 %	95 %	95 %

Pour le cas A, l'incertitude est constante et faible pour tous les impacts, de l'ordre de 5 % en moyenne. En effet, par rapport au calcul de référence, l'incertitude provient du bilan import/export. Or, comme nous l'avons vu dans la section 3.2, l'incertitude induite par un calcul horaire par rapport à un calcul à 10 minutes est de l'ordre de 5 %. Nous observons donc la répercussion de l'incertitude sur l'énergie importée. Ce résultat était prévisible car les impacts environnementaux sont directement proportionnels à la quantité d'énergie importée. Par ailleurs, la dispersion des résultats est également faible : l'incertitude pour le 3^{ème} quartile est de 3 %. Néanmoins, l'incertitude quantifiée ici ne prend pas en compte les incertitudes associées à une mauvaise connaissance de la courbe de charge et celles relatives aux méthodes d'impacts.

Pour le cas B, l'incertitude moyenne n'est plus la même pour tous les impacts. En effet, les erreurs provenant du calcul import-export et de l'agrégation horaire à annuelle pour le calcul environnemental se « cumulent » par rapport au cas précédent. Ces nouveaux termes d'erreurs sont alors plus complexes puisqu'ils sont reliés à la corrélation du profil d'importation au profil du mix électrique. L'incertitude est plus importante pour les impacts suivants : changement

climatique (9 %) et épuisement des ressources fossiles (9 %). Cependant, l'incertitude reste faible par rapport aux incertitudes des méthodes d'impacts aujourd'hui utilisées en ACV (Humbert *et al.*, 2009). Par ailleurs, la dispersion, pour tous les indicateurs, est un peu plus grande que pour le cas A.

Ainsi, à ce jour, pour ce premier lot de courbes de charge et de production, l'apport du mix électrique caractérisé temporellement est relativement faible.

Référence temporelle de 1 minute

Le tableau 4.6 (et le tableau B.6 en annexe) présente les incertitudes moyennes induites par les différentes méthodes de calcul. Pour nos 2700 cas (9 configurations photovoltaïques pour chacun des 300 logements), nous avons calculer les impacts environnementaux de l'électricité importée du réseau. Pour rappel, la référence correspond au calcul le plus fin possible : un calcul import/export réalisé à 1 minute puis agrégé à l'heure et utilisant une donnée environnementale horaire pour le mix électrique. Le cas A correspond à un bilan import/export horaire associé à une donnée environnementale horaire pour le mix électrique. Le cas B correspond à un bilan import/export horaire agrégé au niveau annuel et associé à une donnée environnementale annuelle pour le mix électrique.

TABLE 4.6 – Lot N°2 : Incertitudes moyennes induites par les différentes méthodes de calcul

Indicateurs environnementaux	Référence	Cas A	Cas B
Changement climatique	100 %	93 %	89 %
Acidification	100 %	93 %	91 %
Épuisement des ressources abiotiques -Éléments	100 %	92 %	96 %
Épuisement des ressources fossiles	100 %	93 %	88 %
Utilisation nette d'eau douce	100 %	93 %	94 %
Déchets dangereux éliminés	100 %	92 %	93 %
Déchets non dangereux éliminés	100 %	93 %	92 %
Déchets radioactifs éliminés	100 %	93 %	93 %

Pour le cas A, en moyenne, l'écart avec le calcul de référence est constant et de l'ordre de 7 %. Comme précédemment, la différence observée est la résultante directe de l'incertitude entre un calcul à 1 minute par rapport à un calcul horaire pour l'énergie importée. La dispersion reste faible.

Pour le cas B, l'incertitude moyenne est inférieure à 12 % pour tous les indicateurs. Comme précédemment, elle est plus importante pour le changement climatique et pour l'épuisement des ressources fossiles. Les différences entre le cas B et le cas de référence restent faibles par rapport aux incertitudes des méthodes d'impacts aujourd'hui utilisées en ACV sauf pour le changement climatique où nous atteignons la limite (Humbert *et al.*, 2009). Par ailleurs,

comme pour les données à 10 minutes, la dispersion, pour tous les indicateurs, est un peu plus grande que pour le cas A.

Analyse de sensibilité : représentativité temporelle de la donnée environnementale pour le mix électrique

Les données environnementales horaires ou annuelles du mix électrique utilisées précédemment sont spécifiques à l'année 2012. Par ailleurs, nous rappelons que les données météorologiques sous-jacentes aux courbes de charge (2002-2003 pour le lot n°1) d'une part, et à la production photovoltaïque (années synthétiques) d'autre part, ne sont pas cohérentes entre elles. Il est intéressant de regarder si les observations restent les mêmes pour des données environnementales construites pour d'autres années.

Nous avons donc réitéré nos calculs pour le lot de courbes de charge n°1 en utilisant des données environnementales pour le mix électrique construites pour l'année 2014. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.7 (et en annexes dans le tableau B.7).

TABLE 4.7 – Lot N°1 et mix électrique 2014 : Incertitudes moyennes induites par les différentes méthodes de calcul

Indicateurs environnementaux	Référence	Cas A	Cas B
Changement climatique	100 %	95 %	90 %
Acidification	100 %	95 %	93 %
Épuisement des ressources abiotiques -Éléments	100 %	95 %	97 %
Épuisement des ressources fossiles	100 %	95 %	89 %
Utilisation nette d'eau douce	100 %	95 %	95 %
Déchets dangereux éliminés	100 %	95 %	96 %
Déchets non dangereux éliminés	100 %	95 %	94 %
Déchets radioactifs éliminés	100 %	95 %	95 %

Les observations précédentes (cf. tableau 4.5) restent valables au niveau horaire : faible incertitude et faible dispersion par rapport au cas de référence que ce soit pour un calcul horaire (cas A) ou un calcul horaire-annuel (cas B). Nous observons que les indicateurs changement climatique et épuisement des ressources fossiles restent ceux présentant l'écart le plus important pour le cas B. Ces écarts sont toujours inférieurs aux limites d'incertitudes des méthodes d'impacts.

Par ailleurs, les années 2014 et 2012 sont différentes en termes de mix électrique et d'impacts (cf. figure 4.12). Pour comprendre l'influence de l'année utilisée pour construire la donnée environnementale du mix électrique, nous allons comparer les différences de résultat quand pour la même quantité d'énergie importée et la même méthode de calcul (calcul horaire -cas A), nous changeons entre une donnée environnementale du mix électrique de 2014 ou de 2012 (cf. tableau 4.8).

TABLE 4.8 – Comparaison mix électrique 2012 et 2014 : Incertitudes moyennes pour le lot N°1

Indicateurs environnementaux	Cas A - 2012	Cas A - 2014
Changement climatique	100 %	69 %
Acidification	100 %	77 %
Épuisement des ressources abiotiques -Éléments	100 %	110 %
Épuisement des ressources fossiles	100 %	70 %
Utilisation nette d'eau douce	100 %	100 %
Déchets dangereux éliminés	100 %	82 %
Déchets non dangereux éliminés	100 %	88 %
Déchets radioactifs éliminés	100 %	102 %

Il y a une grande différence, au regard des pratiques actuelles de l'ACV, pour les impacts suivants : changement climatique, acidification des sols et de l'eau, épuisement des ressources biotiques. Si la même analyse est faite avec des données environnementales annuelles, la différence observable entre les impacts est celle entre les deux données environnementales du mix électrique.

Non seulement, la météo a varié entre 2012 et 2014 (cette dernière est considérée comme l'année la plus chaude depuis 1900 (Météo-France, 2015)) mais la maintenance des moyens de production, le prix des matières premières, etc. ont changé ce qui a eu des conséquences sur le mix de production électrique et entraîne des différences sur les impacts du mix électrique. Les différences sont très importantes pour le changement climatique, l'acidification et l'épuisement des ressources fossiles.

La même analyse de sensibilité a été faite avec une donnée environnementale du mix électrique de l'année 2013 (cf. tableau 4.9). Cette fois-ci, la différence est beaucoup moins accentuée.

Ces deux comparaisons montrent la dépendance des résultats d'ACV à l'année utilisée pour construire la donnée environnementale du mix électrique.

TABLE 4.9 – Comparaison mix électrique 2012 et 2013 : Incertitudes moyennes pour le lot N°1

Indicateurs environnementaux	Cas A - 2012	Cas A - 2013
Changement climatique	100 %	100 %
Acidification	100 %	103 %
Épuisement des ressources abiotiques -Éléments	100 %	104 %
Épuisement des ressources fossiles	100 %	98 %
Utilisation nette d'eau douce	100 %	99 %
Déchets dangereux éliminés	100 %	96 %
Déchets non dangereux éliminés	100 %	103 %
Déchets radioactifs éliminés	100 %	98 %

4.2.2.4.3 Bâtiments producteurs d'énergie - Conclusions

Pour rappel, nous nous sommes intéressés ici à des maisons individuelles sans systèmes de chauffage, de refroidissement (ventilation comprise) ou de production eau chaude sanitaire électrique, et équipées de panneaux photovoltaïques.

Aujourd'hui, la modélisation horaire du mix électrique et l'obtention d'une donnée environnementale horaire de l'électricité n'apportent pas une précision considérablement plus grande que l'utilisation d'une donnée environnementale annuelle (même degré d'incertitude de l'ordre de 5 % pour le calcul à 10 min et de l'ordre de 7 % pour le calcul à 1 min). Cette observation reste valable pour ces bâtiments, même s'ils ne sont pas équipés de panneaux photovoltaïques.

Cependant, pour le changement climatique, nous avons vu que ces résultats sont à nuancer. En effet, l'écart entre le calcul de référence (le plus fin possible) et le calcul horaire-annuel commence à être significatif. Ainsi, si dans le futur le calcul énergétique devient plus fin, une modélisation plus fine du mix électrique sera nécessaire.

Par ailleurs, nous avons vu que l'année utilisée pour construire le mix électrique a une influence sur les résultats d'ACV. Cela interroge sur la pertinence de la donnée environnementale à utiliser :

- en conception : mix générique ? Quid de son adéquation avec les météo génériques utilisés en SED ?
- en évaluation : consommations et mix historiques ?

Le chapitre suivant montrera quelle est l'influence de la donnée du mix électrique sur les résultats d'ACV de bâtiments.

De plus, quand un bâtiment est modélisé en ACV, nous l'étudions sur tout son cycle de vie (*a priori* au moins sur 50 ans) : utiliser la même donnée environnementale, basée sur des données historiques, est une limite de l'étude. Dans la section suivante, nous nous intéresserons à l'utilisation d'un mix électrique prospectif.

4.3 Évolution à long terme des mix énergétiques et facteurs de caractérisation dynamiques

4.3.1 Problématiques

L'influence du temps en analyse du cycle de vie ne concerne pas seulement la modélisation du système étudié et l'inventaire mais également la variabilité des impacts environnementaux des différentes émissions dans le temps (une émission aujourd'hui n'aura pas le même impact qu'une émission ayant lieu dans 50 ans).

Cette problématique a notamment été étudiée pour l'impact sur le changement climatique par Levasseur *et al.* (2010). Lors de l'évaluation des impacts, la méthodologie actuelle agrège toutes les émissions et ne distingue pas celles ayant lieu à $t=0$ et celles ayant lieu à $t=75$ ans. La figure 4.16 illustre les incohérences temporelles induites par ce choix pour le calcul de l'impact sur le changement climatique (GWP *Global Warming Potential*) à 100 ans pour un bâtiment d'une durée de vie de 75 ans.

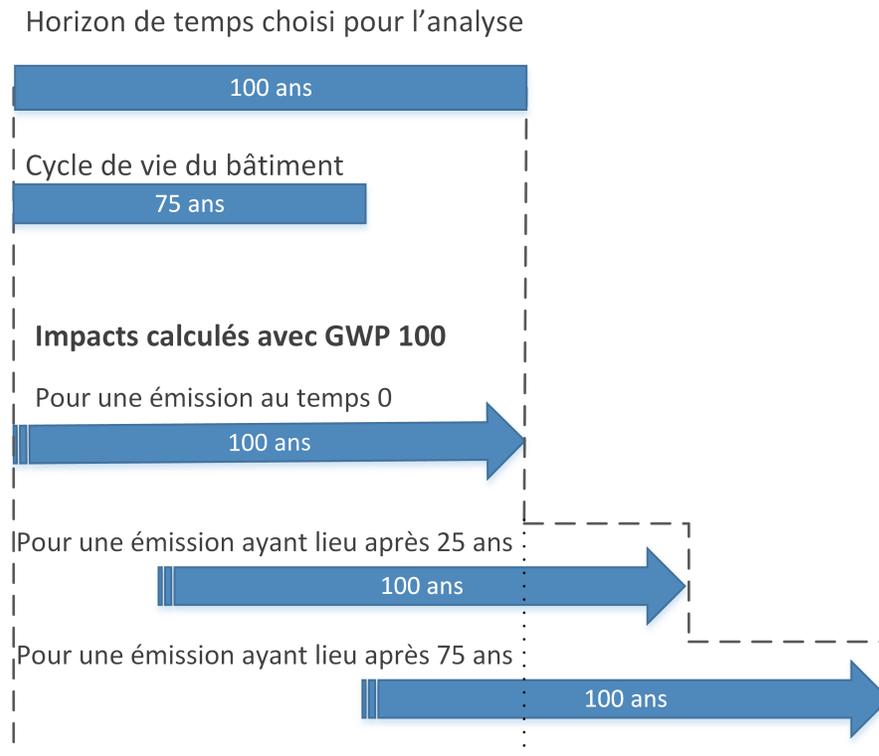


FIGURE 4.16 – Illustration des incohérences temporelles entre émissions et horizon de temps de l'étude (adapté de (Levasseur *et al.*, 2010))

Levasseur *et al.* proposent alors l'utilisation de facteurs de caractérisation dépendant du temps qui permettent de dépasser cette limitation. Ils les utilisent pour l'ACV de biocarburants, et reportent des résultats différents de ceux obtenus avec des facteurs de caractérisation statique.

Shah et Ries (2009) ont également travaillé sur des facteurs de caractérisation dynamiques mais pour un autre indicateur, la formation d’ozone photochimique, et pour le cas particulier des États-Unis.

Collinge *et al.* (2013) ont utilisé un inventaire du cycle de vie et des facteurs de caractérisation dynamiques sur un bâtiment existant puis ont comparé les résultats obtenus avec une ACV traditionnelle pour conclure que les changements dans l’usage et dans l’environnement du bâtiment ont une influence non négligeable sur les impacts environnementaux de ce dernier.

En effet, les bâtiments sont des systèmes non stationnaires à long terme du fait des variations qui interviennent dans l’évolution de la consommation du bâtiment dû à un changement des occupants, des équipements, etc. Par ailleurs, l’évolution du mix énergétique, des moyens de production et matières premières en passant par les évolutions technologiques lors des maintenances ou rénovations ont également une influence sur les performances environnementales du bâtiment à long terme.

La prise en compte de ces aspects rejoint une approche que l’on qualifie d’analyse de cycle de vie prospective. Elle est utilisée pour évaluer des technologies qui n’existent pas de manière opérationnelle aujourd’hui (Chen *et al.*, 2012) (par exemple des filières futures de recyclage) ou pour faire évoluer une partie du système. Par exemple, Pehnt (2006) modélise les évolutions du mix électrique et de la production d’aluminium et d’acier en 2010 et en 2030 et les utilise pour l’ACV de systèmes de production d’énergie renouvelable. Rasmussen *et al.* (2013), quant à eux, modélisent les changements des mix énergétiques utilisés par un bâtiment mais de manière continue (i.e. modélisation de chaque année entre 2011 et 2061).

Pour déterminer les paramètres à étudier dynamiquement, Collet *et al.* (2014) proposent d’utiliser des analyses de sensibilité sur les flux environnementaux pour déterminer ceux devant faire l’objet d’une modélisation dynamique.

Ainsi, l’introduction de considérations temporelles à long terme dans l’évaluation environnementale des bâtiments mérite d’être étudiée et ainsi, nous saurons s’il est nécessaire de les inclure de manière systématique pour l’évaluation des bâtiments.

Pour cela, nous utilisons trois maisons passives de même architecture mais aux principes constructifs différents comme cas d’étude pour tester les différentes problématiques de la prise en compte des aspects temporels à long terme.

4.3.2 Méthodologie

La méthodologie adoptée a consisté à appliquer une ACV « traditionnelle », i.e. non dépendante du temps, aux trois maisons. Par la suite, une méthode d’ACV dite dynamique (ici cette notion correspond à l’utilisation de facteurs de caractérisation dépendant du temps) a été utilisée et les résultats ont été comparé à ceux de l’ACV « traditionnelle ». Enfin, des aspects prospectifs ont été introduits dans les deux modèles. L’objectif était de tester la robustesse des résultats (i.e. le classement de variantes) face à ces différents changements.

4.3.2.1 Description des cas d’étude

Les trois maisons sélectionnées comme cas d’étude sont celles de la plateforme INCAS à Chambéry (Alessi et Sollaris, 2011; Spitz *et al.*, 2012) i.e. la maison OB (ossature bois), la

maison DM (double mur de bloc de béton) et la maison BB (béton banché avec isolation extérieure). Les trois maisons ont une surface habitable de 122 m², la même géométrie, la même architecture et le même niveau d'isolation mais sont construites avec des matériaux et des techniques différentes. Elles ont donc la même unité fonctionnelle.

Le chauffage est assuré par des radiateurs électriques, leurs consommations, en énergie finale, ont été calculées grâce au logiciel COMFIE (Peuportier et Sommereux, 1990). Pour le chauffage, la maison OB consomme donc 12,3 kWh_{EF}/(m².an), la maisons BB 14,3 kWh_{EF}/(m².an) et la maison DM 15,9 kWh_{EF}/(m².an).

L'énergie finale pour les autres usages est évaluée à dire d'expert et est considérée être la même pour toutes les maisons. Elle comprend :

- l'eau chaude sanitaire : 8,1 kWh_{EF}/(m².an) ;
- l'éclairage : 1,9 kWh_{EF}/(m².an) ;
- la ventilation : 1,6 kWh_{EF}/(m².an) ;
- les autres usages domestiques de l'énergie : 20 kWh_{EF}/(m².an) (Sidler, 2009a)

Pour la maison OB, deux scénarios de fin de vie ont été envisagés pour le bois : l'enfouissement ou l'incinération avec récupération d'énergie. Dans le dernier cas, nous considérons que la récupération d'énergie évite l'utilisation de chaleur provenant de gaz naturel.

La durée de vie des maisons est supposée être 100 ans. Le tableau 4.10 résume les scénarios dans le temps pour chaque maison. La fabrication de tous les produits et matériaux de construction est supposée survenir la première année. La distance de transport entre les usines et le site de construction est fixée à 100 km (Lasvaux, 2010)). Les durées de vie des matériaux sont issues de déclarations environnementales de produit (EPD) ; ceux dont la durée de vie est inférieure à 100 ans sont remplacés. En fin de vie, la distance entre le site du bâtiment et le site d'enfouissement est fixée à 20 km. Les équipements sont les mêmes pour les trois maisons et ne sont pas pris en compte dans l'étude.

Nous avons utilisé le logiciel Simapro v8.02 pour établir l'inventaire du cycle de vie des trois maisons et calculer les impacts environnementaux associés. Les données d'arrière-plan sont issues de la base de données ICV génériques ecoinvent v3.01.

Concernant la méthode d'évaluation des impacts, un focus sur le changement climatique a été effectué. Pour l'ACV "traditionnelle", l'indicateur choisi est *Global Warming Potential* à 100 ans . Pour l'ACV dynamique, la méthode de caractérisation dynamique développée par Levasseur *et al.* (2010) a été utilisée.

TABLE 4.10 – Description des scénarios pour les trois maisons

Année	Module EN 15978	OB enfouissement	OB incinération	DM	BB
1	A1-A3 A4-A5	La maison est construite avec une ossature bois	La maison est construite avec une ossature bois	La maison est construite avec un double mur de parpaing avec isolation intérieure	La maison est construite en béton banché avec isolation extérieure
2-50	B6	Usage annuel d'électricité : 5356 kWh _{EF}	Usage annuel d'électricité : 5356 kWh _{EF}	Usage annuel d'électricité : 5794 kWh _{EF}	Usage annuel d'électricité : 5600 kWh _{EF}
30	B5	Les fenêtres sont changées dans toutes les maisons			
35	B5	Les portes sont changées dans toutes les maisons			
50	B5	Les principaux composants des murs sont rénovés. Les déchets sont enfouis (émissions de CH ₄ pendant 150 ans avec torchère).	Les principaux composants des murs ¹ sont rénovés. Les déchets sont brûlés avec récupération d'énergie.	Les principaux composants des murs sont rénovés. Les déchets sont enfouis.	Les principaux composants des murs sont rénovés. Les déchets sont enfouis.
51-99	B6	Usage annuel d'électricité : 5356 kWh _{EF}	Usage annuel d'électricité : 5356 kWh _{EF}	Usage annuel d'électricité : 5794 kWh _{EF}	Usage annuel d'électricité : 5600 kWh _{EF}
60	B5	Les fenêtres sont changées dans toutes les maisons			
70	B5	Les portes sont changées dans toutes les maisons			
90	B5	Les fenêtres sont changées dans toutes les maisons			
100	C1-C4	La maison est déconstruite et les déchets sont enfouis (émissions de CH ₄ pendant 150 ans avec torchère).	La maison est déconstruite et les déchets sont brûlés avec récupération d'énergie.	La maison est déconstruite et les déchets sont enfouis.	La maison est déconstruite et les déchets sont enfouis.

1. Cf. composants avec une durée de vie de 50 ans dans le tableau B.10

4.3.2.2 Prise en compte du carbone biogénique

L'une des maisons étant en bois, nous considérons les échanges de CO₂ biogénique selon les recommandations du GHG Protocol. Le bois est supposé provenir d'une forêt gérée durablement en Aquitaine. L'absorption de CO₂ par les arbres est considérée comme une émission négative, égale au contenu en carbone du bois (Brown *et al.*, 1997). Cette quantité est estimée en utilisant le volume des arbres mesuré par l'Institut Français de la Forêt (20,46 Mm³), la densité du bois (0,51 t sèche.m⁻³), un facteur de croissance pour les arbres et les racines (1,6) et la fraction de carbone par matière sèche (par défaut, 0,5 t C/(t sèche)) (Colin et Derrière, 2005). Les valeurs spécifiques à la forêt de pin d'Aquitaine (volume des arbres, densité du bois et facteur de croissance) viennent d'une étude régionale (Greenhalg *et al.*, 2005). Le stock de CO₂ dans les arbres est donc estimé à 1,496 t CO₂/m³ de bois sec.

Pour le scénario d'incinération, 100% du carbone séquestré est ré-émis sous la forme de CO₂ par la combustion des déchets de bois. Pour le scénario d'enfouissement, la présence de lignite entraîne une faible dégradation du bois. Selon l'étude de Micales et Skog (1997), nous considérons donc que 1,3 % du carbone est libéré sous forme de CO₂ et 1,9 % sous forme de CH₄. Les quantités de gaz libérées sont calculées selon le modèle cinétique du 1^{er} ordre de Vogt et Augenstein (1997) prenant en compte un décalage temporel pour le début des émissions. De plus, 10 % du méthane formé est oxydé sous la forme de CO₂ par la surface supérieure, et 75 % est récupéré et brûlé (i.e. relâché sous la forme de CO₂) sans récupération d'énergie (Miner, 2005), comme c'est la pratique courante aujourd'hui en France (Jaffrin *et al.*, 2003).

Pour les maisons en béton (DM et BB), nous avons inclus l'absorption de CO₂ par le béton au fil du temps (phénomène de carbonatation). Cette absorption dépend de la classe du béton, du traitement de surface, du pourcentage de clinker dans le ciment et de la composition de ce dernier (Pommer *et al.*, 2006). Pour la maison DM, la quantité CO₂ absorbé sur 100 ans est de 5,4 tonnes et de 1,4 tonnes pour la maison BB.

4.3.2.3 ACV dynamique

Dans l'approche dynamique développée par Levasseur *et al.* (2010), nous utilisons les impacts instantanés et cumulatifs sur le changement climatique qui sont calculés grâce aux équations 4.1 à 4.3.

$$DCF(t) = \int_{t-1}^t a \times C(t)dt \quad (4.1)$$

$$GWI_{inst}(t) = \sum_j \sum_{i=0}^t [g_j(i) \times DCF_j(t-i)] \quad (4.2)$$

$$GWI_{cum}(t) = \sum_{i=0}^t GWI_{inst}(t) \quad (4.3)$$

$DCF(i)$, en W.an/(m².kg⁻¹), est le facteur de caractérisation pour évaluer le forçage radiatif d'une émission de GES qui a eu lieu t années auparavant.

a , en $W/(m^2.kg^{-1})$, est l'augmentation du forçage radiatif par unité de masse de GES dans l'atmosphère. Autrement dit, c'est la capacité d'un kilogramme de gaz à augmenter le flux solaire renvoyé vers la Terre.

$C(t)$, en kg/kg , est la concentration atmosphérique du GES t années après l'émission.

L'équation 4.1 représente le forçage radiatif ayant lieu t années après une émission de type impulsion. Le forçage radiatif, comme défini par Ramaswamy *et al.* (2001), est le changement net de l'irradiance (rayonnement solaire arrivant à la surface de la terre) (W/m^2).

L'impact instantané sur le réchauffement climatique, $GWI_{inst}(t)$ en $W.an/m^2$, à un certain temps t est la somme du forçage radiatif au temps t de chaque émission de GES (j dans l'équation 4.2). Le forçage radiatif causé par chaque émission de GES est calculé en multipliant le résultat d'inventaire pour chaque année i , $g_i(j)$ en kg , par le facteur de caractérisation dynamique pour la période écoulée entre l'émission et le temps t .

L'impact cumulatif sur le réchauffement climatique, $GWI_{cum}(t)$ en $W.an/m^2$, est la somme des impacts instantanés GWI_{inst} pour toutes les années entre zéro et t (équation 4.3). C'est la totalité de l'augmentation du forçage radiatif due aux émissions de GES sur cette période.

Le forçage radiatif est utilisé pour évaluer le changement climatique anthropique car il peut être relié au changement global de température de la surface T_s par une relation linéaire : $\Delta T_s = \lambda \times GWI_{cum}$ où λ est un paramètre relatif au climat (Ramaswamy *et al.*, 2001).

Pour la maison en bois, nous considérons qu'après 35 ans de croissance, les arbres sont utilisés pour la construction (Maris *et al.*, 2010). Pendant ces 35 ans, leur absorption de carbone est constante avec un taux de $11,6 kg C/(m^3.an)$ (cf. calculs du 4.3.2.2).

Par ailleurs, avec l'ACV dynamique, comme le montre Levasseur *et al.* (2013), une nouvelle question se pose : devons-nous modéliser la croissance des arbres avant ou après la construction ? Ces deux hypothèses correspondent à deux types de scénarios différents. Le premier est un scénario d'afforestation où les arbres sont plantés dans le but de les utiliser dans le secteur de la construction. Dans le deuxième cas, une forêt naturelle est exploitée pour la construction et des arbres sont replantés par la suite dans la perspective d'une exploitation durable, comme l'ont modélisé (Bergman *et al.*, 2012) pour l'inventaire dynamique du bois de construction.

La deuxième hypothèse est celle que nous avons retenue pour cette étude car la forêt de pins d'Aquitaine n'a pas été plantée pour le secteur de la construction. La seconde hypothèse est cependant étudiée dans le cadre d'une analyse de sensibilité.

4.3.2.4 Aspects prospectifs

Ici, nous voulons également considérer les aspects à long terme pour l'évaluation environnementale des bâtiments.

Tout d'abord, nous nous intéressons au futur mix électrique, c'est-à-dire au changement de mix électrique pendant la phase d'usage des maisons. Pour cela, toujours en utilisant une approche dynamique, nous recalculons les résultats ACV des quatre maisons avec le mix électrique européen (UCTE mix) à la place du mix électrique français.

En effet, nous disposons des ICV prospectifs issus du projet européen NEEDS (*New Energy Externalities Development for Sustainability*) pour évaluer les effets des changements

du mix européen en 2025 et 2050 (Frischknecht *et al.*, 2009). Nous considérons deux scénarios contrastés : pessimiste et *business as usual* (PE) et très-optimiste et 440 ppm de CO₂ dans l’atmosphère (VO). Le scénario PE considère que la situation économique ne stimule pas l’innovation et que les quelques développements dans le secteur de la production d’électricité ne mènent qu’à un mix électrique principalement basé sur des combustibles fossiles. Dans le scénario VO, une percée technologique est supposée : les centrales au fioul sont remplacées par de nouvelles centrales au gaz ou au charbon et des technologies de captage et de stockage du carbone sont mises en place. Ainsi, même si la part des combustibles fossiles ne décroît pas, la cible des 440 ppm de CO₂ dans l’atmosphère est atteinte en 2050.

Par ailleurs, nous avons également considéré des améliorations dans la production des matériaux qui sont changés lors de la rénovation à 50 ans. Dans une première approche, ces améliorations ne sont prise en compte que pour les matériaux remplacés les plus impactants.

Pour la maison en bois (OB), les panneaux de particules utilisés pour les murs sont particulièrement impactant et sont principalement composés de ciment. Gäbel et Tillman (2005) ont étudié les effets sur les émissions de GES de l’utilisation de matériaux récupérés pour la production de clinker et le remplacement des combustibles fossiles par des combustibles alternatifs. Nous avons utilisé leur meilleur scénario et considéré que, dans 50 ans, les émissions de la production du béton seront réduites de 26 % pour le CO₂, 43 % pour le CO, 84 % pour le CH₄ et 83 % pour les composés organiques volatiles.

Pour les deux maisons en béton (BB et DM), le produit le plus impactant lors de la rénovation est le polystyrène expansé. Or, sa production a déjà peu d’impacts sur le changement climatique ; la seule amélioration considérée ici est d’utiliser des hydrofluorocarbures alternatifs et non du CO₂ pour le souffler (Kellenberger *et al.*, 2007).

Les différents scénarios considérés sont résumés dans le tableau 4.11. Bien entendu, d’autres aspects prospectifs auraient pu être pris en compte mais ceux considérés ici sont représentatifs de l’évolution du contexte du bâtiment.

TABLE 4.11 – Description des scénarios prospectifs considérés

Scénarios	Paramètres	
	Mix électrique	Rénovation
1 (Référence)	Mix européen actuel	Normal
2 (VO-N)	Mix européen très optimiste (VO)	Normal
3 (PE-N)	Mix européen pessimiste (PE)	Normal
4 (A-A)	Mix européen actuel	Amélioré
5 (VO-A)	Mix européen très optimiste (VO)	Amélioré
6 (PE-I)	Mix européen pessimiste	Amélioré

4.3.3 Résultats

4.3.3.1 Prise en compte du carbone biogénique

La figure 4.17 montre les résultats d’ACV des quatre maisons sur l’indicateur changement climatique (focus de notre étude). La maison en bois (OB) est la moins impactante pour les

deux scénarios de fin de vie considérés. La maison double-mur (DM) est la troisième option la plus favorable tandis que la maison en béton banché (BB) est la plus impactante.

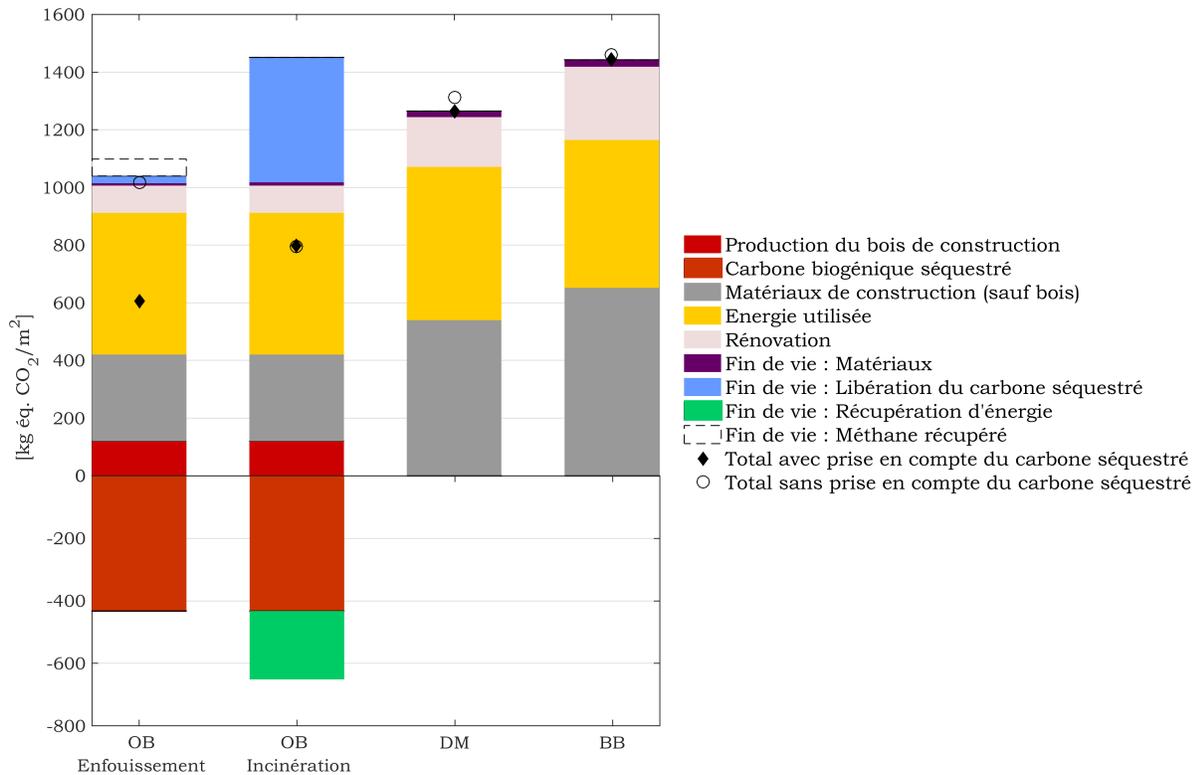


FIGURE 4.17 – Impact sur le Changement Climatique (100 ans) pour les maisons individuelles construites en béton ou en bois obtenu en utilisant l’ACV « traditionnelle »

Pour la maison OB, l’enfouissement est moins impactant que l’incinération car 97 % du carbone séquestré par le bois reste stocké de manière permanente. De plus, 75 % du méthane relâché est supposé être récupéré et brûlé en torchère i.e. relâché dans l’atmosphère sous forme de CO₂.

L’incinération est moins impactante que l’enfouissement si le carbone biogénique n’est pas pris en compte. En effet, pour l’enfouissement, le bilan pour le carbone biogénique n’est pas neutre car il est relâché sous forme de CH₄ et non de CO₂.

Ces résultats sont dépendants des paramètres utilisés pour la modélisation de la dégradation du bois en décharge et du choix de l’énergie évitée par l’incinération. Nous avons effectué une analyse de sensibilité où 14 % du carbone séquestré est relâché pour moitié sous forme de CO₂ et pour moitié sous forme de CH₄ (Wang *et al.*, 2013). L’enfouissement reste alors une alternative plus favorable que l’incinération bien que la différence entre les deux impacts baisse de 31 à 12 %. De plus, nous pourrions avoir un gain plus important pour l’incinération en considérant que la production d’énergie évitée provient d’un autre type de combustible comme le fioul (au lieu du gaz). Enfin, ces conclusions ne sont valides que pour le changement climatique et d’autres impacts peuvent avoir lieu avec l’incinération ou l’enfouissement.

On notera également la contribution significative des matériaux à l'impact sur le Changement Climatique (impacts liés à la production des matériaux initiaux ainsi qu'à ceux de la rénovation); ils représentent environ 60 % de l'impact pour les deux maisons en béton et autour de 30 % pour la maison en bois (due à la réduction de l'impact total par la prise en compte du carbone biogénique).

4.3.3.2 Approche dynamique

La figure 4.18 présente les impacts instantanés (A) et cumulatifs (B) pour le changement climatique des quatre maisons obtenus avec la méthode d'ACV dynamique.

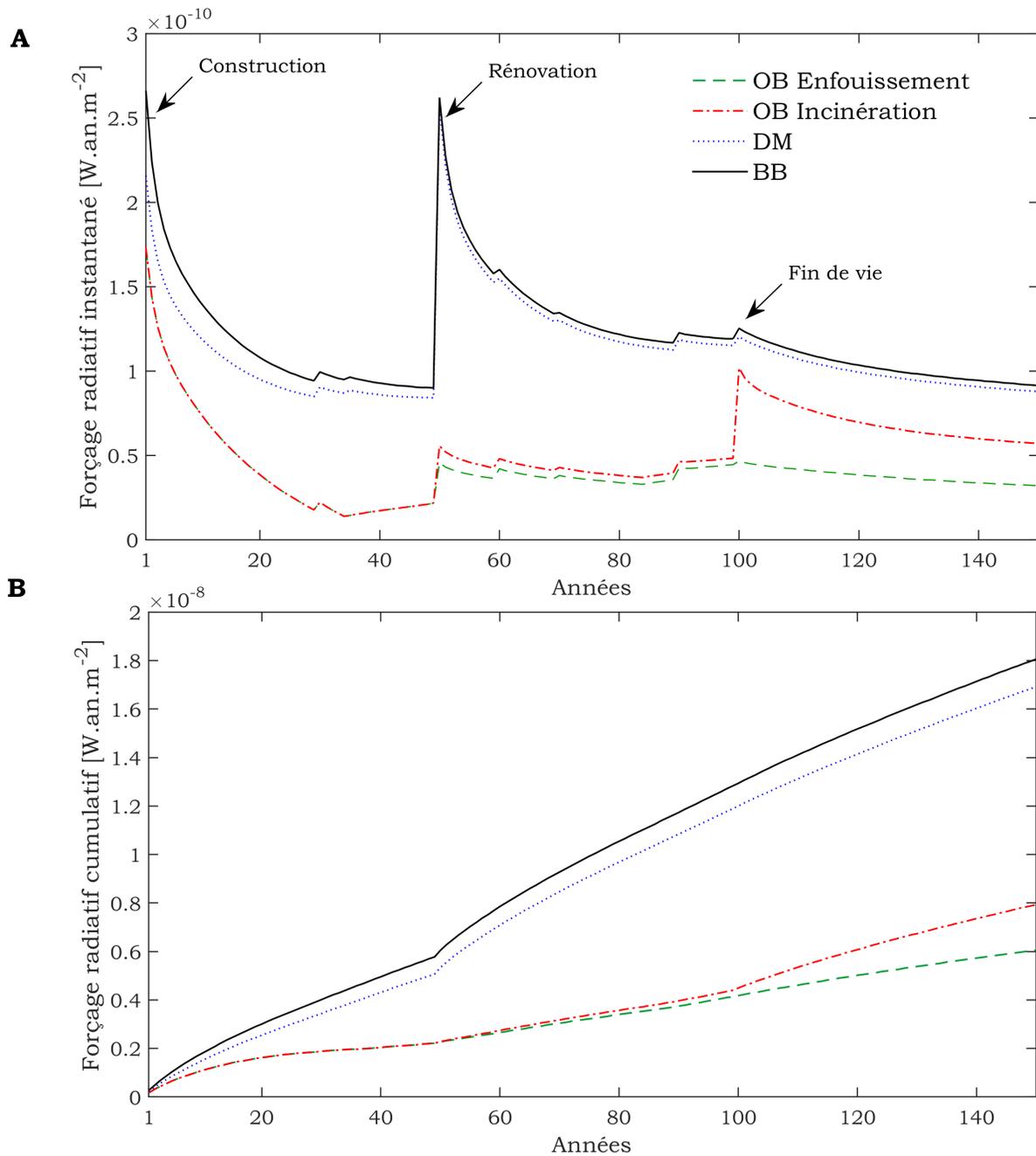


FIGURE 4.18 – Impact sur le Changement Climatique instantané(A) et cumulatif (B) pour les quatre maisons obtenu avec la méthode d’ACV dynamique

La première année nous observons une augmentation de l’impact instantané pour toutes les maisons due à la production des matériaux de construction.

Pour la maison en bois (OB), pendant les 35 années suivantes, l’absorption de carbone par les arbres en croissance ainsi que l’absorption naturelle par les puits de carbone contribuent à diminuer le forçage radiatif. Pour les maisons en béton (BB et DM), un phénomène équivalent est observé mais avec une moindre ampleur (pente plus faible) puisque seuls les puits de

carbone contribuant à la disparition des GES de l’atmosphère sont considérés. La quantité de GES émise pendant la phase d’utilisation par la production d’électricité en France contribue également à l’augmentation du forçage radiatif instantané. Cependant, cet effet est plus faible que celui de la disparition de GES de l’atmosphère par les puits de carbone.

Entre les années 35 et 50, pour la maison OB, une augmentation du forçage radiatif instantané se produit car l’absorption de carbone par la croissance des arbres s’arrête et que la quantité de GES absorbée par les puits de carbone est plus faible que celle émise par l’électricité française.

Aux années 30 et 35 respectivement, les fenêtres et les portes sont changées dans toutes les maisons. A 50 ans, les principaux composants des murs sont rénovés dans toutes les maisons entraînant une augmentation du forçage radiatif instantané, plus forte dans le cas des maisons en béton que pour celle en bois. Pour cette dernière, l’augmentation est plus faible pour le scénario d’enfouissement car une partie du carbone reste séquestré dans le bois enfoui. Pour les deux scénarios de fin de vie, de nouveaux arbres poussent pendant 35 ans et du carbone est à nouveau séquestré.

Pour finir, l’impact instantané continue de décroître pour les maisons en béton même après l’élimination et la fin de vie de ces dernières. En effet, les émissions de GES dues au cycle de vie des maisons sont toujours en cours d’élimination de l’atmosphère par les puits de carbone. Pour la maison en bois incinérée, la fin de vie entraîne une augmentation du forçage radiatif instantané, expliquée par la libération du carbone biogénique sous forme de dioxyde de carbone. Pour la maison en bois enfouie, il y a une légère augmentation du forçage radiatif due à la libération d’une petite partie du carbone biogénique sous la forme de méthane et de dioxyde de carbone. Pour toutes les maisons, le forçage radiatif va tendre vers une valeur d’équilibre et reviendra au niveau d’avant émission (ici zéro) seulement après des milliers d’années. En effet, les processus de séquestration du CO₂ atmosphérique via les puits de carbone sont très lents (Cherubini *et al.*, 2011) et selon le modèle de Bern sur le cycle du carbone, cette séquestration sera principalement le résultat d’un équilibre entre la concentration en CO₂ de la couche supérieure de l’océan et celle de l’atmosphère (Prentice *et al.*, 2001).

Pour le forçage radiatif cumulatif, les résultats montrent que la maison BB a l’impact le plus grand pour le changement climatique quelque soit l’horizon temporel considéré, suivi par la maison DM. La maison OB a un bien plus petit impact (moins de 35 % pour un horizon de temps de 100 ans et moins de 45 % pour un horizon de temps de 150 ans) quelque soit la fin de vie considérée. L’enfouissement apporte des bénéfices additionnels dû au carbone stocké de façon permanente.

TABLE 4.12 – Comparaison des résultats obtenus avec les approches statiques et dynamiques pour des horizons de temps de 100 et 500 ans

Méthode	100 ans				500 ans			
	OB enfouissement	OB incinération	DM	BB	OB enfouissement	OB incinération	DM	BB
Traditionnelle	42 %	55 %	90 %	100 %	39 %	57 %	94 %	100 %
Dynamique	32 %	35 %	93 %	100 %	33 %	53 %	95 %	100 %

Comme le montre le tableau 4.12, entre l'approche dynamique et l'approche statique, le classement et la meilleure variante restent les mêmes. Cependant, les différences entre les maisons sont dépendantes de l'approche utilisée et de l'horizon de temps sélectionné.

Nous observons des écarts plus grands pour l'horizon de temps 100 ans avec l'approche dynamique qu'avec l'approche statique. En effet, la durée de vie des maisons a été considérée comme étant de 100 ans, et avec l'approche dynamique, à 100 ans, les impacts de la fin de vie ne sont pas pris en compte alors qu'ils le sont avec l'approche statique bien qu'ils aient lieu plus tard par rapport à l'horizon de temps de l'étude. En augmentant le temps d'horizon, les résultats entre les deux approches deviennent plus proches.

Concernant les scénarios pour la forêt (moment de la pousse des arbres), les résultats sont présentés à la figure 4.19 et au tableau 4.13.

Les résultats sont considérablement plus petits (environ 30 % plus petit pour un horizon de temps de 500 ans pour les deux scénarios de fin de vie) quand les arbres sont supposés pousser avant la construction.

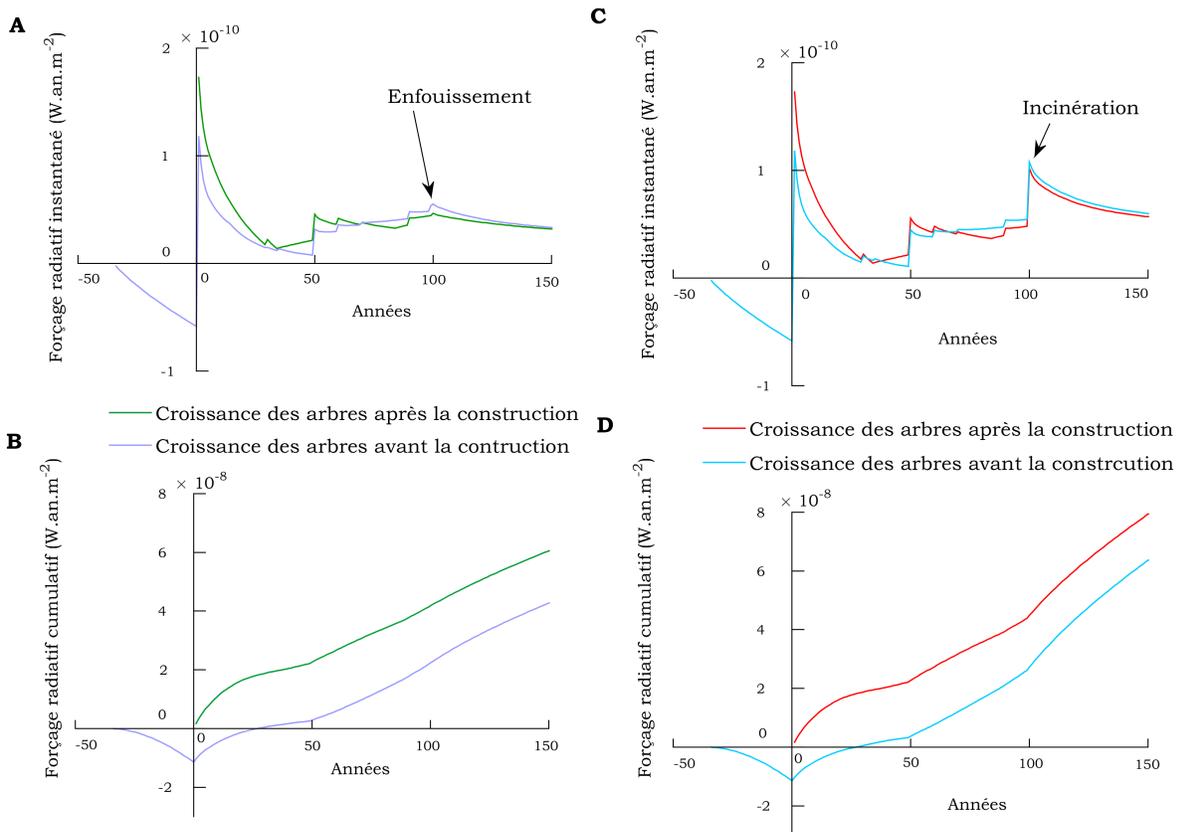


FIGURE 4.19 – Impact sur le Changement Climatique instantané (A-C) et cumulatif (B-D) pour la maison en bois (OB) avec deux scénarios de fin de vie : enfouissement (A-B) et incinération (C-D) obtenu avec la méthode d'ACV dynamique et deux prises en compte de la gestion de la forêt

TABLE 4.13 – Comparaison des résultats obtenus avec l’approche dynamique en fonction des hypothèses retenues pour la forêt pour des horizons de temps de 100 et 500 ans

Hypothèses forêt	100 ans				500 ans			
	OB enfouissement	OB incinération	DM	BB	OB enfouissement	OB incinération	DM	BB
Croissance des arbres avant la construction	6 %	8 %	93 %	100 %	27 %	47 %	95 %	100 %
Croissance des arbres après la construction	32 %	35 %	93 %	100 %	33 %	53 %	95 %	100 %

4.3.3.3 Aspects prospectifs

Le tableau 4.14 présente les résultats pour les différents scénarios prospectifs en pourcentage pour comparaison entre les maisons et le tableau 4.15 donne les résultats pour les scénarios prospectifs en pourcentage pour comparaison entre scénario. Le premier tableau permet d’étudier les éventuels changements de classement de variantes entre les scénarios tandis que le deuxième tableau permet de comparer les valeurs de résultats pour une même maison pour les différents scénarios. Les résultats pour chaque maison des différents scénarios prospectifs sont disponibles dans le tableau B.11 en annexe.

Le premier scénario est celui de référence c’est-à dire qu’aucun aspect prospectif n’est considéré mais le mix électrique utilisé est européen (et non pas le mix français). Les différences entre la maison en bois (OB) et les maisons en béton (BB et DM) sont réduites dans le scénario de référence car les émissions de GES pour le mix européen sont plus importantes que celles du mix français.

Le classement entre les maisons reste le même pour tous les scénarios. Celui qui donne les plus petits résultats pour toutes les maisons est le 5^{ème} (VO-A) où le mix européen évolue de manière à réduire ses émissions de GES et où la production des matériaux utilisés lors de la rénovation est améliorée.

Même pour les scénarios pessimistes sur le mix électrique (PE-N et PE-A), les résultats sont réduits car de petites améliorations sont prises en compte pour le mix électrique.

Le scénario d’amélioration des matériaux de la rénovation (scénario 3 A-A) réduit légèrement l’écart entre la maison en bois et les maisons en béton.

Pour chaque maison, par rapport au scénario de référence, les résultats sont réduits de 40 à 50 % quand un mix optimiste est considéré et d’environ 20 % pour un mix pessimiste.

Pour tous les scénarios, comme observé précédemment, l’utilisation d’un horizon de temps de 100 ans ne permet pas de différencier les options de fin de vie pour la maison OB. Cependant, pour l’horizon de temps de 500 ans, les différences sont plus grandes et permettent de réaffirmer que pour les hypothèses choisies l’enfouissement des matériaux bio-sourcés reste la meilleure option pour la maison en bois.

TABLE 4.14 – Comparaison des résultats en pourcentage entre maisons obtenus avec les scénarios prospectifs et l'ACV dynamique pour des horizons de temps de 100 et 500 ans

Scénarios	100 ans				500 ans			
	OB enfouissement	OB incinération	DM	BB	OB enfouissement	OB incinération	DM	BB
1 (Réf.)	64 %	65 %	98 %	100 %	72 %	79 %	100 %	100 %
2 (VO-N)	45 %	47 %	95 %	100 %	46 %	62 %	97 %	100 %
3 (PE-N)	59 %	61 %	97 %	100 %	67 %	75 %	99 %	100 %
4 (A-A)	68 %	69 %	98 %	100 %	72 %	80 %	100 %	100 %
5 (VO-A)	48 %	51 %	94 %	100 %	45 %	64 %	95 %	100 %
6 (PE-A)	63 %	64 %	97 %	100 %	67 %	76 %	99 %	100 %

TABLE 4.15 – Comparaison des résultats en pourcentage entre les scénarios prospectifs pour les quatre maison INCAS obtenus avec l'ACV dynamique pour des horizons de temps de 100 et 500 ans

Scénarios	100 ans				500 ans			
	OB enfouissement	OB incinération	DM	BB	OB enfouissement	OB incinération	DM	BB
1 (Réf.)	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
2 (VO-N)	44 %	45 %	60 %	62 %	31 %	38 %	47 %	48 %
3 (PE-N)	80 %	88 %	86 %	87 %	78 %	80 %	83 %	83 %
4 (A-A)	100 %	100 %	94 %	95 %	100 %	100 %	98 %	99 %
5 (VO-A)	43 %	45 %	55 %	57 %	29 %	38 %	45 %	47 %
6 (PE-A)	79 %	80 %	80 %	81 %	76 %	79 %	81 %	82 %

Nous avons également calculé les résultats en utilisant les scénarios prospectifs mais cette fois-ci avec l'approche ACV traditionnelle. Le classement reste le même et les écarts entre la maison en bois et les maisons en béton sont légèrement plus faibles que dans les résultats obtenus avec l'approche dynamique. De plus, les observations faites avec l'approche dynamique sont toujours valides : le mix électrique optimiste (scénarios VO-N et VO-A) donne les résultats les plus discriminants entre les maisons et l'amélioration de la production des

matériaux lors de la rénovation a peu d'impact.

Bien que dans ce cas particulier, considérer des aspects prospectifs ne change pas les résultats du classement entre les maisons, cela pourrait être le cas pour d'autres études. Par exemple, des bâtiments avec une consommation énergétique plus grande lors de l'usage veraient leurs impacts sur le changement climatique baisser de manière plus significative que des bâtiments avec une consommation énergétique plus faible mais avec des impacts matériaux plus importants. Cela pourrait entraîner un potentiel changement dans le classement.

Les aspects prospectifs peuvent être utilisés pour évaluer la résilience des conclusions aux évolutions de l'environnement du bâtiment. Pourtant, prédire des données futures est source d'une grande incertitude. Cependant, modéliser les émissions et les flux d'un cycle de vie sur une période de 100 ans, en utilisant des données actuelles sur les matériaux, la production et la consommation d'énergie et les scénarios de fin de vie est également très incertain et ne reflète pas la réalité (Rasmussen *et al.*, 2013)).

4.3.3.4 Conclusions

Les conclusions de cette étude permettent d'affirmer que même si on a bien une cohérence entre les différents moments des émissions et le cadre temporel choisi pour l'étude, les résultats (en terme de classement de variantes) restent les mêmes entre l'approche statique et l'approche dynamique.

Pour le carbone biogénique, son bilan n'est pas toujours neutre et vaut la peine d'être pris en compte. Avec l'approche dynamique, la question de la gestion de forêt (afforestation vs déforestation) se pose et est significative pour les résultats.

Concernant les aspects prospectifs, malgré leurs incertitudes, ils ont permis, dans ce cas, de valider la résilience des conclusions (classement de variantes) face à certains changements intervenants dans le bâtiment ou son environnement. L'évolution du mix électrique, quelle soit optimiste ou pessimiste, entraîne une baisse des résultats de chaque maison.

Des compléments à cette étude sont disponibles dans l'article de (Fouquet *et al.*, 2015).

4.4 Conclusions générales

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux données environnementales utilisées pour le calcul du contributeur énergie. Plus particulièrement, nous avons choisi de nous concentrer sur les données relatives aux vecteurs énergétiques : gaz et électricité car à eux seuls ils représentent la majorité de l'énergie consommée par le secteur du bâtiment en France aujourd'hui.

Tout d'abord, nous nous sommes intéressés aux variations à court terme avec la variabilité des sources de production pour l'électricité et avec la variabilité des sources d'approvisionnement pour le gaz.

Ensuite, c'est un horizon temporel plus lointain que nous avons étudié avec l'usage de scénarios et de données prospectives pour le mix électrique européen. A défaut de données disponibles, une étude similaire n'a pas pu être menée sur le gaz naturel.

Le tableau 4.16 résume les observations que nous avons pu effectuer sur l'influence des données environnementales en fonction de l'horizon temporel.

Pour le mix électrique, les variations à court terme influencent faiblement à moyennement les résultats d'ACV en fonction de la typologie du bâtiment. Nous détaillerons ce point dans le paragraphe suivant. Les variations à long terme, quant à elles, ont une influence moyenne car même si sur nos cas d'étude, aucun changement de classement de variantes n'a été observé, les résultats numériques sont grandement affectés.

Pour le mix gazier, les variations à court terme, via l'approvisionnement, ont peu d'influence sur les résultats d'ACV du contributeur énergie.

Les observations faites ici sont valables, à l'heure actuelle, pour les cas d'études auxquels nous nous sommes intéressés et méritent d'être actualisées et complétées.

Par ailleurs, nous n'avons pas considéré la variation des impacts des moyens de production de l'électricité en fonction de leur utilisation i.e. une centrale utilisée à 50 % de sa capacité n'aura pas forcément les mêmes impacts qu'une centrale utilisée à 100 % de sa capacité (hypothèse actuellement retenue dans les bases de données ACV).

TABLE 4.16 – Synthèse de l'influence en fonction de l'horizon temporel

Variable	Horizon temporel	
	Court terme	Long terme
Mix électrique	Faible à moyenne	Moyenne
Mix gazier	Faible	(non étudié)

En fonction de la typologie du bâtiment, les variations temporelles à court terme du mix électrique ont une influence différente. Le tableau 4.17 fait le lien avec le chapitre précédent et l'étude de la donnée d'entrée énergétique en résumant à quel pas de temps le bilan énergétique doit être effectué et à quel pas de temps le mix électrique doit être modélisé en fonction de la typologie du bâtiment.

Pour des bâtiments sans chauffage électrique et sans production photovoltaïque, un pas de temps annuel suffit, que ce soit pour le bilan énergétique ou pour le mix électrique.

Pour des bâtiments avec chauffage électrique, un bâtiment ancien devra être étudié au pas de temps horaire car sa consommation de chauffage sera fortement corrélée au pic de puissance national du mix électrique. Au contraire, pour un bâtiment neuf, sa consommation de chauffage sera fortement réduite et un bilan énergétique et un mix électrique annuels suffisent à l'évaluation.

Lorsque de la production photovoltaïque est prise en compte, qu'importe le type de bâtiment, le bilan énergétique import-export doit être réalisé *a minima* au pas de temps horaire. Pour le mix électrique, un mix annuel suffit pour des bâtiments sans chauffage électrique. Pour les bâtiments neufs équipés de chauffage électrique, un mix annuel peut *a priori* convenir également.

Encore une fois, ces résultats sont valables aujourd'hui pour les études retenues mais doivent être complétés et mis à jour de manière régulière.

TABLE 4.17 – Synthèse pas de temps recommandés pour le calcul du contributeur énergie

Cas de bâtiment		Bilan énergétique (Import/Export)	Mix électrique
Bâtiment sans chauffage électrique		Annuel	Annuel
Bâtiment avec chauffage électrique	Ancien	(Semi-)Horaire	(Semi-)Horaire
	Neuf	Annuel	Annuel
Bâtiment avec production photovoltaïque	Sans chauffage électrique	Horaire	Annuel
	Avec chauffage électrique	Horaire	<i>Annuel</i>

Il faudra cependant choisir quelles sont les données environnementales sur les vecteurs énergétiques à utiliser selon l'usage. En conception, une approche la plus générique possible est souhaitable tandis que pour l'évaluation (et la réglementation), une approche basée sur des données historiques mises à jour régulièrement pourrait être envisagée.

Par ailleurs, pour les technologies de MDE comme l'effacement, une autre modélisation du mix électrique, qui prendrait en compte les interactions avec le réseau, pourrait être plus appropriée.

Dans ce chapitre et le précédent, nous nous sommes intéressés aux données nécessaires (consommations d'énergie et données environnementales des vecteurs énergétiques) au calcul du contributeur énergie pour l'évaluation environnementale des bâtiments. Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons aux résultats et à leurs expressions.

Chapitre 5

Sensibilité des résultats d'ACV du contributeur énergie et de l'ensemble bâtiment à la variabilité temporelle et méthodologique

Les deux chapitres précédents ont permis de caractériser les données nécessaires au calcul des impacts environnementaux.

Plus particulièrement, nous avons vu dans le chapitre précédent que les impacts environnementaux des vecteurs énergétiques varient. Construire des données génériques qui prennent en compte ces variations n'est pas triviale. A l'échelle des bases de données, cela se traduit par différentes valeurs d'impact pour le même vecteur énergétique. Par exemple, pour l'électricité consommée en France, la donnée environnementale utilisée dans ELODIE (base de donnée TEAM) donne un impact environnemental sur le changement climatique de 89.3 g $\text{eq. CO}_2/\text{kWh}$, la base de donnée de l'ADEME (IMPACT) de 79 g $\text{eq. CO}_2/\text{kWh}$ et celle du bilan Carbone de 82 g $\text{eq. CO}_2/\text{kWh}$ (pour l'année 2012). Ainsi, il apparaît nécessaire de s'interroger sur la sensibilité des résultats d'ACV à la variabilité des données environnementales. La section 5.1 traitera donc de la sensibilité des résultats d'ACV aux variations des vecteurs énergétiques.

Par ailleurs, comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, les bâtiments producteurs d'énergie nécessitent une adaptation des règles d'ACV bâtiment existantes. En outre, il existe différentes méthodes de prise en compte de la production locale d'énergie et celles-ci influencent considérablement le bilan du bâtiment et donc notre perception de celui-ci. La section 5.2 s'intéressera donc à ces méthodes et à leurs influences sur les résultats d'ACV du bâtiment.

Enfin, la section 5.3 synthétisera les conclusions des deux études.

5.1 Sensibilité des résultats d'ACV à la variabilité temporelle des vecteurs énergétiques

Dans cette partie, nous nous intéressons à la sensibilité des résultats d'ACV bâtiment à la variabilité temporelle des données environnementales des vecteurs énergétiques. Plus particulièrement, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, cette variabilité est particulièrement importante pour l'électricité ; c'est pourquoi nous concentrerons notre étude sur cette dernière. Pour le gaz, la variabilité des sources d'approvisionnement a peu d'impacts par rapport à ceux de l'utilisation et cette variabilité ne sera pas visible sur les résultats d'ACV.

Grâce aux données de production de RTE et à la modélisation du mix électrique détaillée dans la section 4.2.2.1, nous disposons de distributions sur les différentes valeurs d'impacts de l'électricité comme nous pouvons le voir sur la figure 5.1. Ces données sont représentatives de la consommation d'électricité en France entre 2007 et 2014.

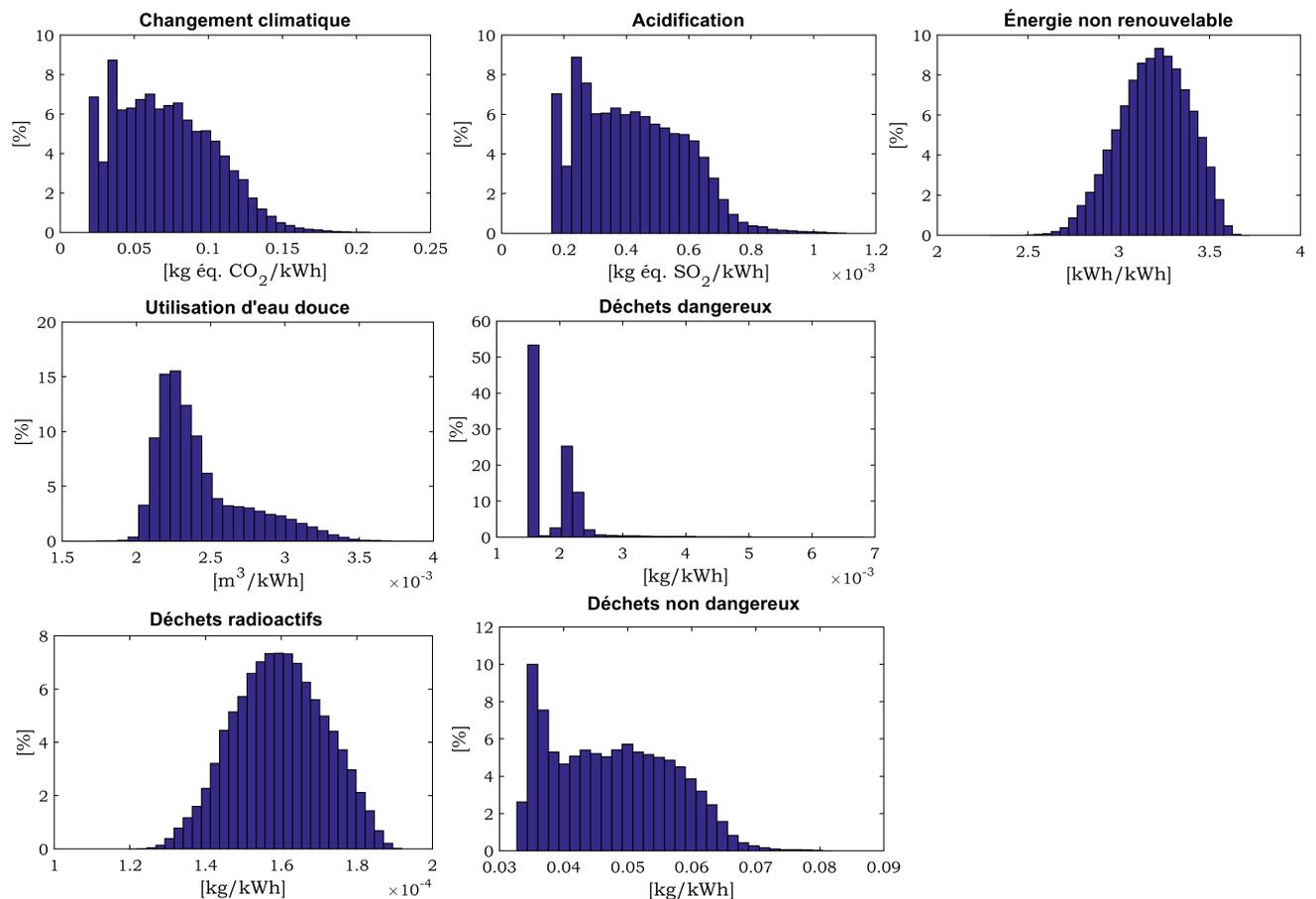


FIGURE 5.1 – Distribution des impacts d'un kilowattheure consommé en France représentative de la variation horaire du mix électrique entre 2007 et 2014

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les pertes sur le réseau haute tension et le réseau basse et moyenne tension ne sont pas constantes. A partir des données fournies

par RTE, nous reconstituons donc une distribution des pertes haute tension (RTE, 2012) et à partir des données ERDF, une distribution des pertes sur le réseau basse et moyenne tension (ERDF, 2015) et cela pour la même période que pour le mix électrique entre 2007 et 2012.

Nous utiliserons donc ces distributions pour caractériser la sensibilité des résultats d’ACV à la variabilité temporelle du mix électrique à deux échelles : celle du contributeur énergie seul et celle du bâtiment (i.e. tous contributeurs).

5.1.1 Cas d’étude : Bâtiments HQE Performance

Pour disposer d’un panel diversifié de bâtiments , nous reprenons les modélisations de 67 bâtiments effectuées dans le cadre de l’expérimentation HQE Performance 2012 (Lebert *et al.*, 2013). Le tableau 5.1 présente la typologie (MI : Maison Individuelle, IC : Immeuble Collectif, BB : Bâtiment de Bureaux, B_{SOC} : Bâtiment Social, B_{ENS} : Bâtiment d’Enseignement), le C_{EP} , la SHON et la part d’électricité dans les consommations énergétiques (tous usages et non seulement réglementaire) pour l’ensemble de l’échantillon. Un C_{EP} négatif indique un bâtiment producteur d’énergie. La part d’électricité dans les consommations énergétiques peut alors être nulle car tous les besoins électriques sont supposés être assurés par cette production.

TABLE 5.1: Description succincte des 67 bâtiments de l’expérimentation HQE Performance 2012

Cas	Typologie	C_{EP} [kWh _{EP} /m ² /an]	SHON (m ²)	Part de l’électricité dans la consommation énergétique (%)
1	MI groupées	38.4	559	34
2	MI	57.6	196	29
3	MI	-33.9	208	0
4	MI	64.3	91	63
5	MI	70	121	43
6	MI	50	148	68
7	MI	43.2	153	76
8	MI	50	120	44
9	MI	65	134	100
10	MI	ND ¹	298	100
11	MI	70	104	100
12	MI	40	151	100
13	MI	40.1	130	47
14	MI	50.4	206	38
15	MI	55.0	110	34
16	MI	31.8	147	45
17	MI	45	177	41
18	MI	5	150	30

Description succincte des 67 bâtiments de l'expérimentation HQE Performance 2012

Cas	Typologie	C_{EP} [kWh _{EP} /m ² /an]	SHON (m ²)	Part de l'électricité dans la consommation énergétique (%)
19	MI	47.9	108	45
20	MI	-10.6	147	0
21	MI	22.3	234	100
22	MI	45	256	55
23	IC	60	1237	41
24	IC	60	5553	48
25	IC	55	887	38
26	IC	30.3	1424	11
27	IC	60	1686	46
28	IC	-12.2	933	57
29	IC	65	1937	34
30	IC	39.9	2136	47
31	IC	65	3277	48
32	IC	76.7	608	34
33	IC	65	3728	42
34	IC	45	2585	52
35	IC	65	1953	40
36	IC	49.8	4210	48
37	IC	43.6	2734	59
38	IC	59.0	5405	52
39	IC	61.3	4687	35
40	B _{SOC}	-1.1	763	0
41	B _{SOC}	35.4	1656	56
42	B _{ENS}	-28.2	5178	0
43	BB	65	6660	100
44	BB	70	630	13
45	BB	50	15800	100
46	BB	78.1	17470	99
47	BB	74.7	23673	94
48	BB	65.1	13254	100
49	BB	32	9118	100
50	BB	29	10800	48
51	BB	13.0	868	0
52	BB	69	7500	68
53	BB	77.2	72000	83
54	BB	79.1	19168	85
55	BB	6.0	35000	51
56	BB	78.4	49063	81

Description succincte des 67 bâtiments de l'expérimentation HQE Performance 2012

Cas	Typologie	C_{EP} [kWh _{EP} /m ² /an]	SHON (m ²)	Part de l'électricité dans la consommation énergétique (%)
57	BB	68	42300	70
58	BB	65	23000	78
59	BB	71	13800	54
60	BB	-56	2385	0
61	BB	45	3344	100
62	BB	82.8	17055	100
63	BB	50	2400	100
64	BB	53.1	5748	63
65	BB	48.6	5865	81
66	BB	71.4	30827	100
67	Autre	65	747	50

En ACV, pour calculer des incertitudes et au regard du nombre important de paramètres en jeux, une simulation de Monte Carlo est souvent utilisée. Pour chaque paramètre d'inventaire, une distribution de probabilité est définie. Puis, les résultats sont recalculés via des tirages aléatoires pour chaque paramètre (Huijbregts, 1998).

Ainsi, nous effectuons une simulation de Monte Carlo (MC) en faisant varier :

- dans un premier temps, les impacts de l'électricité suivant les distributions présentées sur la figure 5.1 et les pertes du réseau électrique ;
- dans un second temps, pour chaque typologie de bâtiments, les impacts de l'électricité, les pertes du réseau et le cas de bâtiments.

Le faible nombre de paramètres étudiés ici ne justifie pas l'usage d'une simulation de Monte Carlo, mais une fois le modèle construit, d'autres paramètres peuvent être modifiés pour prendre en compte leurs variations, par exemple les autres vecteurs énergétiques ou les matériaux et produits de construction via les travaux de Hoxha (2015).

Nous effectuons 100 000 tirages avec remise avec un échantillonnage simple : une configuration du mix électrique (i.e. pourcentages des différents moyens de production) est alors choisie parmi 120 500 données et les sept impacts environnementaux correspondants sont calculés. Nous effectuons également un tirage pour la valeur de perte sur le réseau haute tension parmi 94 943 données et un pour la valeur de perte sur le réseau basse tension parmi 94 943 données.

Dans notre première simulation, nous utilisons ces trois paramètres pour recalculer les impacts environnementaux de l'électricité de chaque bâtiment du panel HQE Performance puis ceux du contributeur énergie et enfin ceux du bâtiment. Nous étudions alors l'influence de la variabilité de l'électricité sur chaque bâtiment.

7. Non renseigné

Pour la deuxième simulation, nous effectuons en plus un tirage sur le bâtiment (1 à 67 parmi le panel HQE Performance) et nous recalculons ainsi les impacts de l'électricité, du contributeur énergie et ceux du bâtiment. Ici, nous voulons connaître la variabilité des résultats pour différentes typologies de bâtiment.

5.1.2 Résultats

La sensibilité des résultats à la variabilité des impacts de l'électricité est présentée à l'échelle du contributeur énergie puis pour tout le bâtiment. Enfin, nous comparons nos résultats à ceux obtenus dans le projet HQE Performance.

5.1.2.1 Sensibilité des résultats d'ACV à la variabilité temporelle du mix électrique à l'échelle du contributeur énergie

La figure 5.2 présente pour chacun des 67 bâtiments de l'échantillon la valeur moyenne de l'impact sur le changement climatique du contributeur énergie obtenue avec notre simulation de Monte-Carlo et l'écart-type sous forme de barre d'erreur représentant la variabilité du résultat. Les figures pour les autres impacts sont disponibles à l'annexe C.1.1. Compte tenu de leurs fonctions particulières, une catégorie "Autres" regroupe les deux bâtiments sociaux, le bâtiment d'enseignement et le bâtiment autre (un corps de ferme).

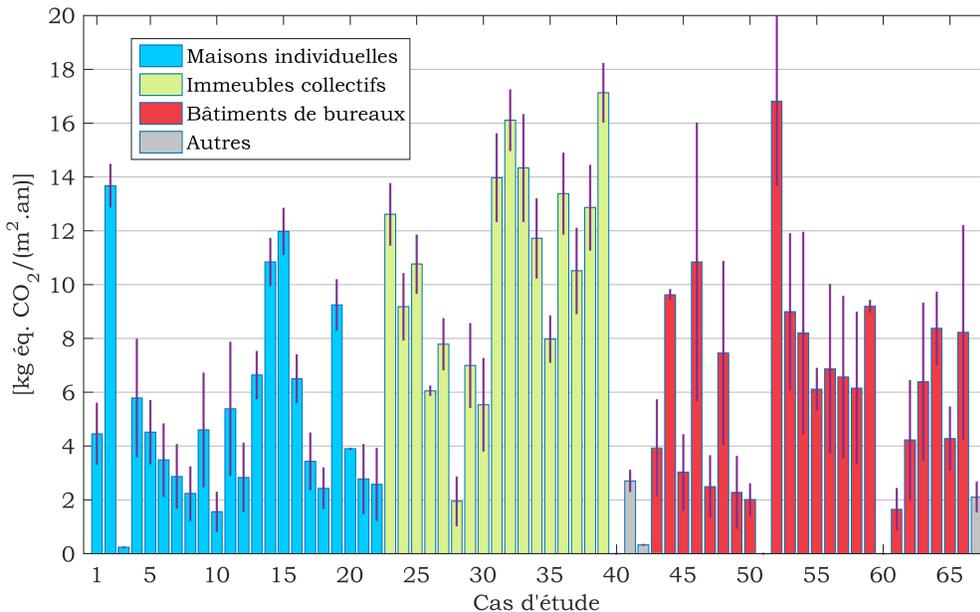


FIGURE 5.2 – Sensibilité des résultats à la variabilité temporelle du mix électrique à l'échelle du contributeur énergie pour le changement climatique

Nous pouvons classer les bâtiments dans différentes catégories :

1. Ceux qui utilisent une grande quantité d'autres vecteurs énergétiques que l'électricité dont l'impact sur le changement climatique est élevé (e.g. le gaz naturel), comme le bâtiment 2 ;

2. Ceux qui n'utilisent que de l'électricité, comme le bâtiment 9 ;
3. Ceux qui utilisent des vecteurs énergétiques peu impactants ou des énergies renouvelables et peu d'électricité, comme le bâtiment 42 ;
4. Ceux qui utilisent beaucoup d'électricité et des quantités importantes d'autres énergies impactants sur le changement climatique (e.g. du gaz), comme le bâtiment 52.

Dans la première catégorie, les bâtiments ont un impact élevé et une sensibilité faible. Dans la deuxième catégorie, les impacts sont peu élevés et les sensibilités sont faibles. Dans la troisième catégorie, les bâtiments présentent un impact peu élevé et une sensibilité faible. Enfin, dans la quatrième catégorie, les bâtiments ont un impact élevé et une sensibilité grande. Comme nous l'attendions, la sensibilité est d'autant plus grande que la consommation d'électricité l'est.

En moyenne sur tous les bâtiments, la sensibilité de l'impact du contributeur énergie sur le changement climatique due à la variabilité temporelle du mix électrique est de ± 21 %. Pour les immeubles collectifs, elle tombe à ± 11 % tandis qu'elle augmente à ± 32 % pour les bâtiments de bureaux. Comme nous pouvons le voir sur le tableau 5.1, cela est dû au fait que les bâtiments de bureaux utilisent en majorité de l'électricité pour couvrir leurs besoins énergétiques alors que les immeubles collectifs utilisent moins d'électricité et d'autres énergies.

Concernant les autres catégories d'impacts, en moyenne sur tous les bâtiments, la sensibilité due à la variabilité du mix électrique sur le contributeur énergie est de :

- ± 28 % pour l'acidification ;
- ± 25 % pour l'énergie non renouvelable ;
- ± 11 % pour l'utilisation d'eau douce ;
- ± 24 % pour les déchets dangereux ;
- ± 18 % pour les déchets non dangereux ;
- ± 7 % pour les déchets radioactifs.

Ainsi, à l'échelle du contributeur énergie, la sensibilité à la variabilité du mix électrique n'est pas négligeable ; notamment pour les impacts suivants : changement climatique, acidification, énergie non renouvelable et déchets dangereux.

Nous allons ensuite étudier cette sensibilité à l'échelle des résultats d'ACV du bâtiment.

5.1.2.2 Sensibilité des résultats d'ACV à la variabilité temporelle du mix électrique à l'échelle du bâtiment

La figure 5.3 présente pour chaque bâtiment de l'échantillon la valeur moyenne de l'impact du bâtiment sur le changement climatique, obtenue avec notre simulation de Monte-Carlo et l'écart-type sous forme de barre d'erreur représentant la variabilité du résultat. Les figures pour les autres impacts sont disponibles à l'annexe C.1.2.

En moyenne, la sensibilité de l'impact sur le changement climatique à l'échelle des résultats globaux est de ± 7 %. Là encore, elle est plus faible, ± 5 % pour les immeubles collectifs et plus élevée pour les bâtiment de bureaux, ± 9 %.

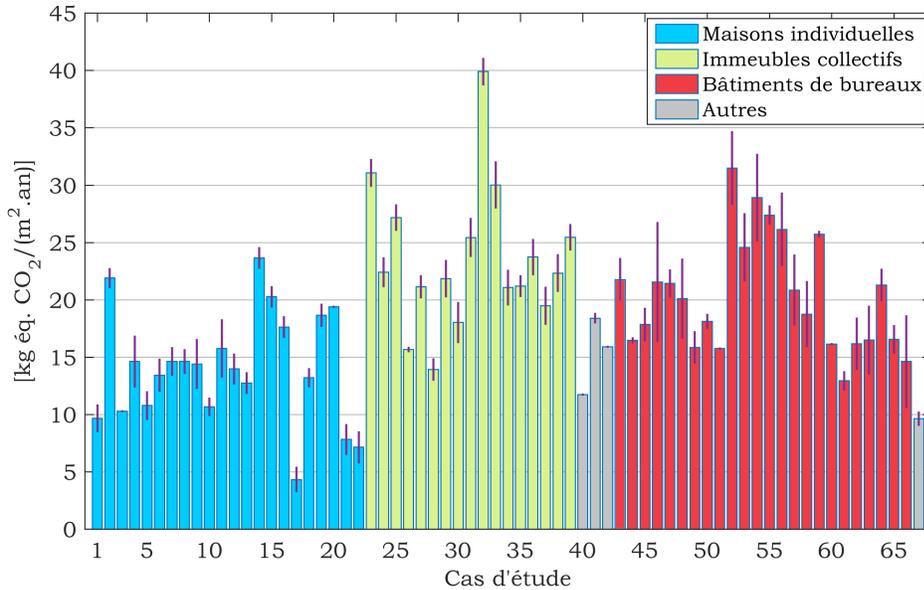


FIGURE 5.3 – Sensibilité des résultats à la variabilité temporelle du mix électrique à l’échelle du bâtiment pour le changement climatique

Ainsi, la sensibilité des résultats est plus faible qu’à l’échelle du contributeur énergie. En effet, à l’échelle du bâtiment, d’autres contributeurs sont pris en compte comme le contributeur composant, qui est un contributeur majeur à l’impact sur le changement climatique (Lebert *et al.*, 2013) ce qui réduit l’influence de la variabilité temporelle du mix électrique sur les résultats.

Pour les autres catégories d’impacts, nous observons également une baisse de la sensibilité due à la variabilité du mix électrique des résultats à l’échelle du bâtiment :

- ± 8 % pour l’acidification ;
- ± 4 % pour l’énergie non renouvelable ;
- ± 1 % pour l’utilisation d’eau douce ;
- $\pm 2,4$ % pour les déchets dangereux ;
- $\pm 0,6$ % pour les déchets non dangereux ;
- ± 6 % pour les déchets radioactifs.

Ainsi, à l’échelle du bâtiment complet, la sensibilité à la variabilité temporelle du mix électrique est faible pour toutes les catégories d’impacts.

Dans la section suivante, nous allons ainsi vérifier si les valeurs de référence obtenues dans le projet HQE Performance sont dépendantes de la donnée environnementale sur l’électricité.

5.1.2.3 Comparaison avec les valeurs de référence HQE Performance

Le projet HQE Performance a permis d’obtenir des premières valeurs de référence sur l’évaluation environnementale des bâtiments. Notre étude permet de vérifier la sensibilité de ces valeurs à la variabilité temporelle du mix électrique.

Les figures 5.4 à 5.7 représentent, sous forme de boxplots¹, la variation des résultats d'ACV obtenus avec le projet HQE Performance et ceux obtenus en prenant en compte la variabilité temporelle du mix électrique. Nous observons ces résultats toutes typologies confondues puis pour chaque typologie : bâtiments de bureau, immeubles collectifs et maisons individuelles.

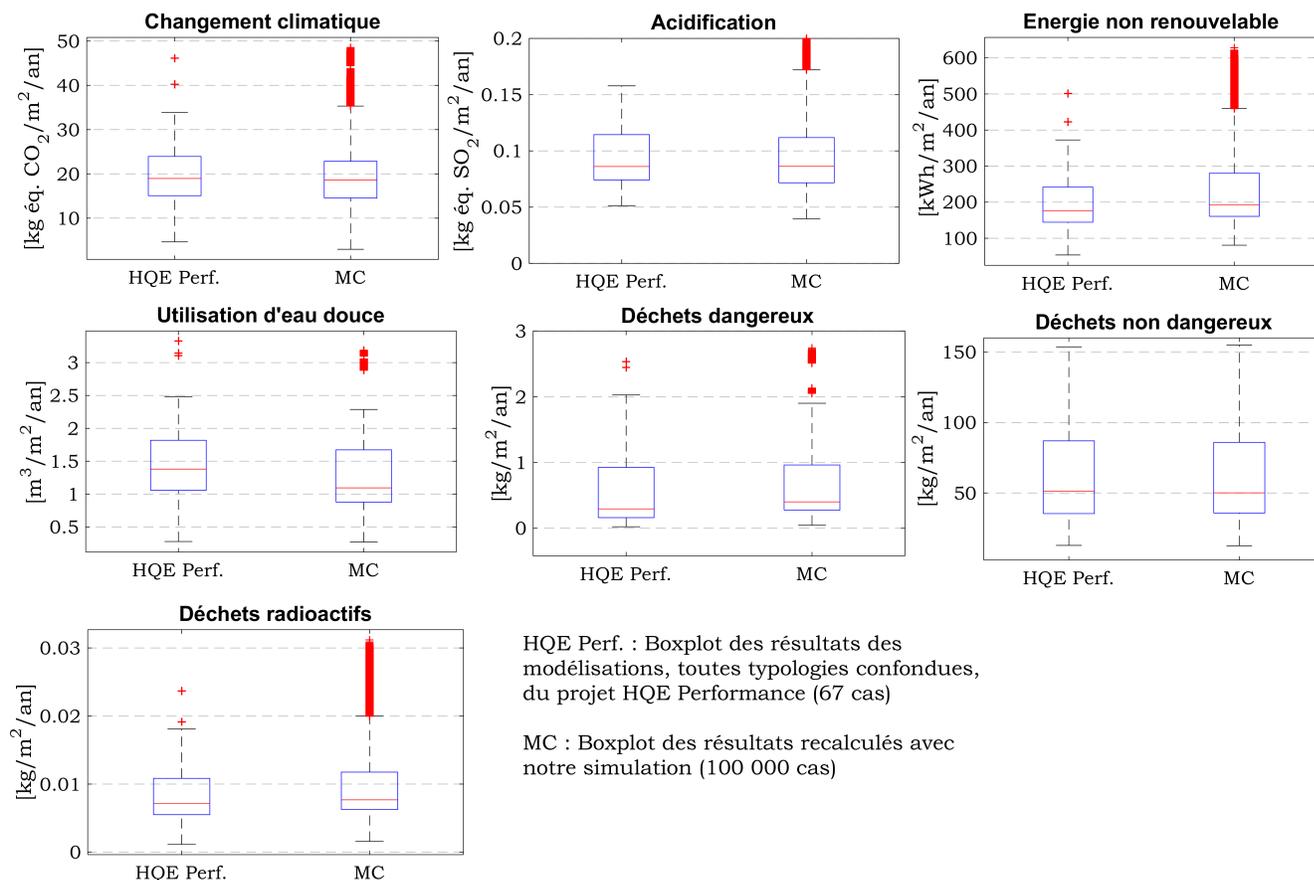


FIGURE 5.4 – Comparaison des boxplots de l'expérimentation HQE Performance et de notre étude pour toutes les typologies de bâtiments

1. Une description de cette représentation se trouve dans le glossaire

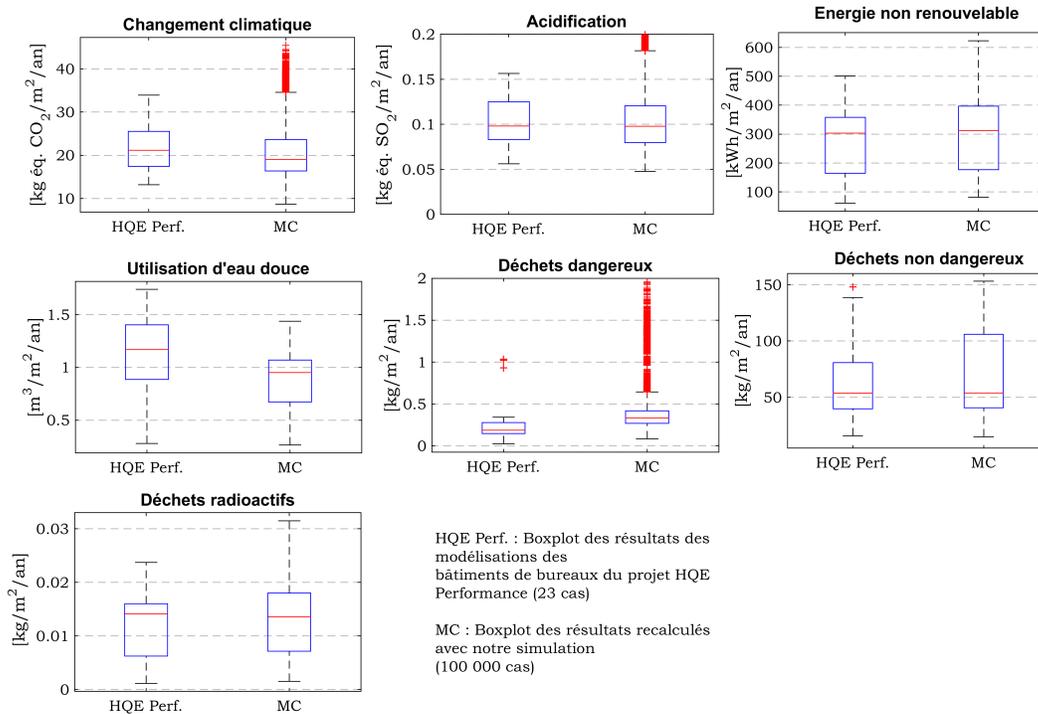


FIGURE 5.5 – Comparaison des boxplots de l’expérimentation HQE Performance et de notre étude pour les bâtiments de bureaux

Globalement, les valeurs médianes, l’écart inter-quartile (taille de la boîte) et les moustaches sont les mêmes. Les valeurs extrêmes sont plus nombreuses avec notre simulation car il y a plus de données (100 000 contre 67 pour les résultats HQE Performance). Leur nombre peut paraître élevé mais elles ne représentent pas plus de 4 % de l’ensemble des données quelque soit le boxplot. Pour le changement climatique et l’utilisation nette d’eau douce, la médiane est plus élevée pour les résultats d’HQE Performance que pour notre étude. Cela est dû à des écarts dans les données environnementales utilisées pour modéliser le mix électrique (base de données DEAM pour HQE Performance et ecoinvent pour notre modélisation).

Sur la figure 5.5, les écarts sont plus accentués entre les différents boxplots. En effet, une grande part des besoins énergétiques des bâtiments de bureaux est assurée par l’électricité et celle-ci est donc plus affectée par la variabilité temporelle du mix électrique.

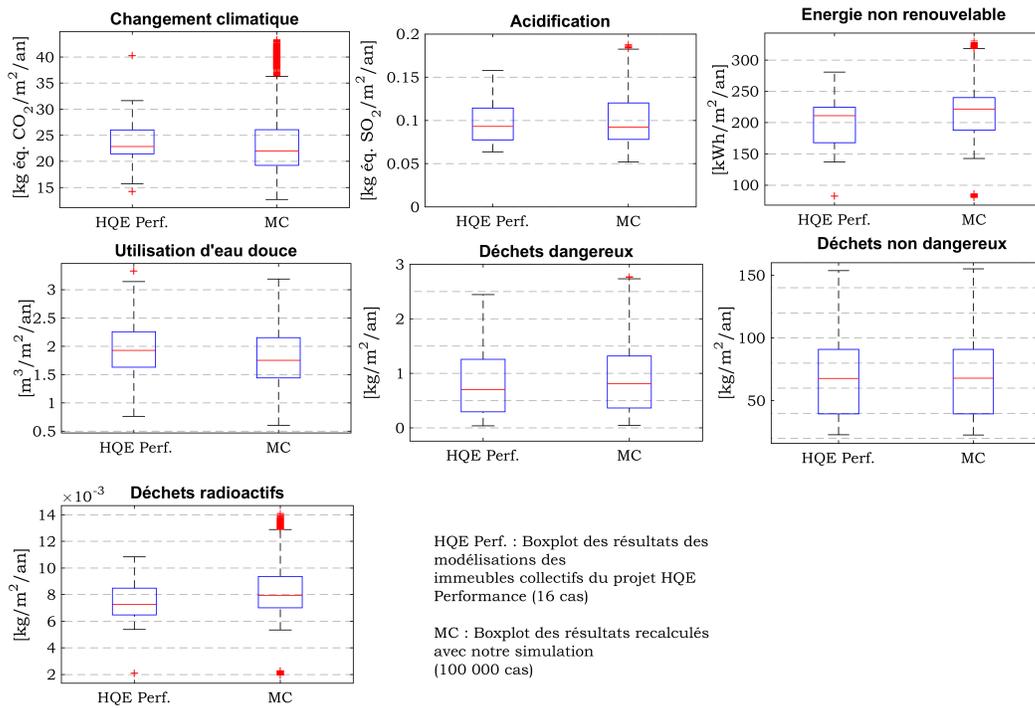


FIGURE 5.6 – Comparaison des boxplots de l’expérimentation HQE Performance et de notre étude pour les immeubles collectifs

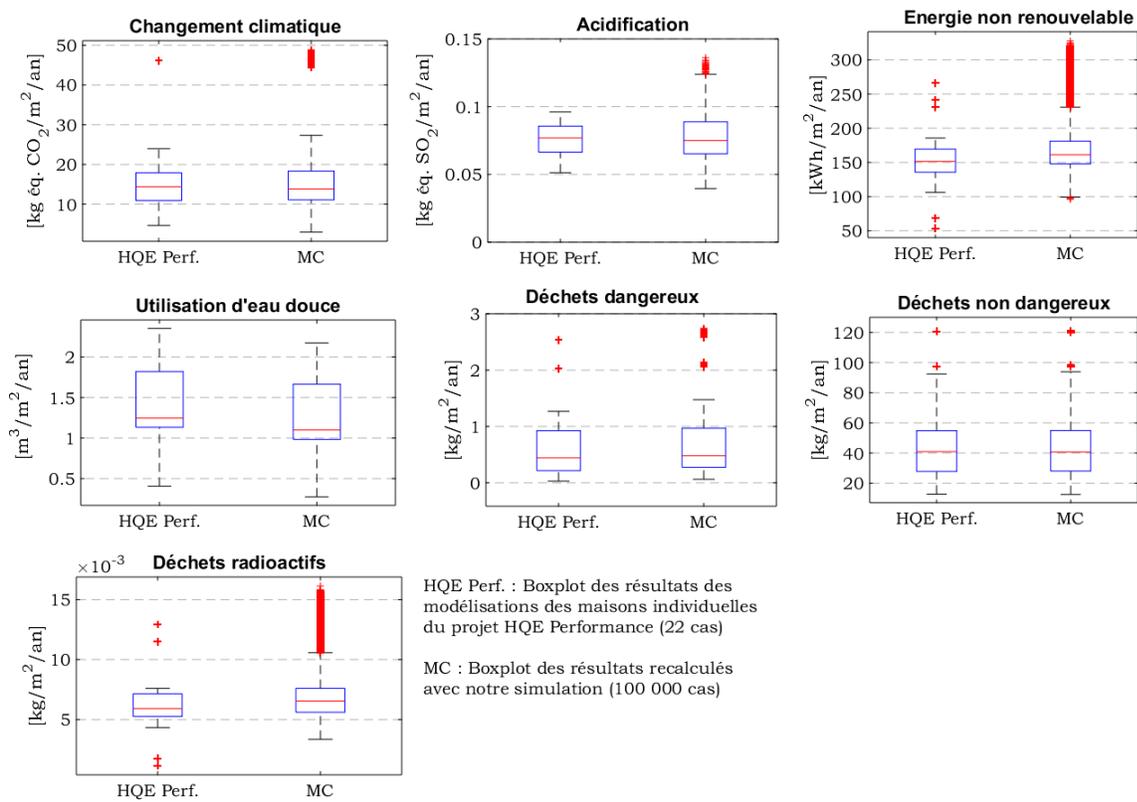


FIGURE 5.7 – Comparaison des boxplots de l'expérimentation HQE Performance et de notre étude pour les maisons individuelles

5.1.3 Conclusions

Pour conclure, la sensibilité des résultats d'ACV à la variabilité temporelle du mix électrique est importante à l'échelle du contributeur énergie. A l'échelle du bâtiment, elle est réduite et ne reste faiblement significative que pour les indicateurs acidification, changement climatique et déchets radioactifs.

De plus, les valeurs de référence calculées dans le projet HQE Performance sont peu sensibles à la variabilité du mix électrique lors de la phase d'usage. Ainsi, les valeurs de référence calculées dans le projet HQE Performance seront toujours valides et pourront servir de seuils pour la future réglementation tant que la donnée environnementale utilisée pour le mix électrique se situe dans la plage moyenne de variation des impacts horaires obtenus entre 2007 et 2014. Une donnée devra pourtant être fixée pour s'assurer de la reproductibilité des études.

Par ailleurs, cette analyse doit être étendue à d'autres vecteurs énergétiques ainsi qu'aux autres contributeurs pour connaître l'incertitude des résultats d'ACV et mieux accompagner les acteurs dans leurs pratiques de l'ACV.

5.2 Influence des méthodologies de prise en compte de la production locale d'énergie

Lorsqu'une production locale d'énergie est prise en compte, nous avons vu que les normes française et européenne sur la performance environnementale des bâtiments demandent à ce qu'une distinction soit faite entre l'énergie auto-consommée et celle importée. Cependant, il existe des différences entre les deux normes sur la méthode pour comptabiliser les impacts de la mise à disposition des équipements de production d'énergie (fabrication, utilisation, entretien et fin de vie) :

- Dans la norme française, les impacts de la mise à disposition des équipements de production étaient répartis entre le bâtiment et l(es) entité(s) utilisant l'énergie exportée (autres bâtiments ou réseau) au prorata de la part d'énergie produite consommée sur site ;
- Dans la norme européenne, actuellement en vigueur, les impacts des équipements sont entièrement affectés au bâtiment.

Par ailleurs, du point de vue de l'ACV, un bâtiment producteur d'énergie est un système multi-fonctionnel. Ainsi, selon la norme ISO 14044 (ISO, 2006a) et ILCD Handbook (JRC, 2011b), en ACV attributionnelle, deux approches peuvent être utilisées pour gérer la multifonctionnalité : l'expansion du système, appelée également méthode des impacts évités ou la méthode d'allocation des co-produits. La méthode des impacts évités considère l'énergie exportée en dehors du site comme de l'énergie non produite par le réseau. Ainsi, les impacts de l'énergie du réseau sont dits évités. La méthode des co-produits correspond à la méthode utilisée dans la norme française. Le schéma de la figure 5.8 résume donc les trois méthodes utilisables en ACV bâtiment pour la prise en compte de la production locale d'énergie.

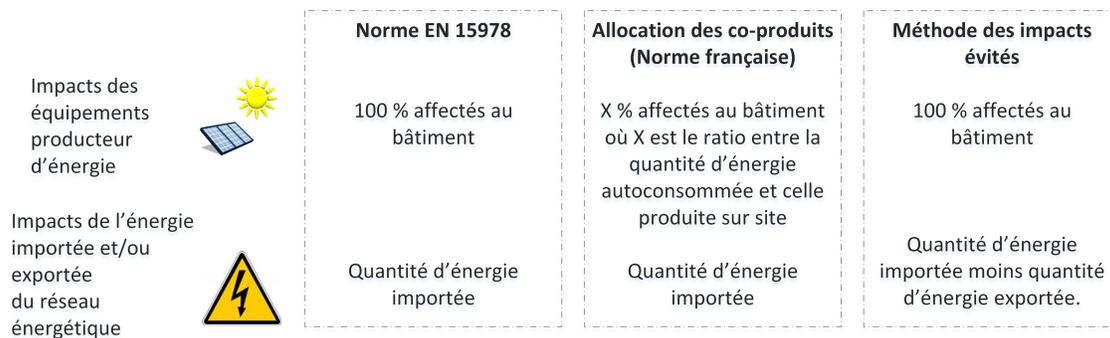


FIGURE 5.8 – Trois méthodes possibles pour la prise en compte de la production locale d'énergie en ACV bâtiment

van der Voet *et al.* (2010) ont montré que le choix des méthodes d'allocation ont une influence non négligeable sur les résultats d'ACV de biocarburants. En l'absence de consensus, ils conseillent d'effectuer des analyses de sensibilité sur les méthodes d'allocation.

Par la suite, nous allons également étudier quelles sont les implications de ces méthodes sur les résultats d'ACV réalisées à l'échelle du bâtiment puis à l'échelle de l'îlot.

5.2.1 Prise en compte de la production locale à l'échelle du bâtiment

Pour simplifier la démonstration, nous nous plaçons ici dans le cas d'un bâtiment équipé de panneaux photovoltaïques. Les résultats restent tout de même valables pour d'autres types de production locale d'énergie. A l'échelle des bâtiments, les différentes méthodes de calcul peuvent être formulées des manières suivantes :

— Pour la norme EN 15978 :

$$\vec{I}_{bât} = E_{importée} \times \vec{I}_{mix} + \vec{I}_{PV} + \vec{I}_{autres} \quad (5.1)$$

— Pour la méthode des co-produits :

$$\vec{I}_{bât} = E_{importée} \times \vec{I}_{mix} + \frac{E_{autoconsommée}}{E_{produite,PV}} \times \vec{I}_{PV} + \vec{I}_{autres} \quad (5.2)$$

— Pour la méthode des impacts évités :

$$\vec{I}_{bât} = (E_{importée} - E_{exportée}) \times \vec{I}_{mix} + \vec{I}_{PV} + \vec{I}_{autres} \quad (5.3)$$

$\vec{I}_{bât}$ est le vecteur des impacts environnementaux du bâtiment sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment

$E_{importée}$ est la quantité d'électricité importée du réseau électrique

$E_{autoconsommée}$ est la quantité d'électricité photovoltaïque utilisée sur site

$E_{produite,PV}$ est la quantité d'électricité produite par les panneaux photovoltaïques

$E_{exportée}$ est la quantité d'électricité exportée vers le réseau électrique

\vec{I}_{mix} est le vecteur des impacts environnementaux du mix électrique français

\vec{I}_{PV} est le vecteur des impacts environnementaux de la mise à disposition des panneaux photovoltaïques

\vec{I}_{autres} est le vecteur des impacts environnementaux des autres contributeurs (matériaux et produits de construction, autres énergies, eau, chantier, déchets).

La différence entre les équations 5.1 et 5.2 est $\vec{I}_{PV} \times (1 - \frac{E_{autoconsommée}}{E_{produite,PV}})$:

Les impacts du bâtiment calculés avec la méthode de la norme En 15978 seront toujours supérieurs à ceux calculés avec la méthode des co-produits. Cette différence diminue lorsque le taux d'auto-consommation du bâtiment augmente.

La différence entre les équations 5.1 et 5.3 est $E_{exportée} \times \vec{I}_{mix}$:

Les impacts du bâtiment calculés avec la méthode de la norme En 15978 seront toujours supérieurs à ceux calculés avec la méthode des impacts évités. Cette différence s'accroît lorsque la quantité d'énergie exportée croît également.

Entre les équations 5.2 et 5.3, la différence est $E_{exportée} \times \vec{I}_{mix} - \vec{I}_{PV} \times (1 - \frac{E_{autoconsommée}}{E_{produite,PV}})$. Dans ce cas, il n'y a pas de différence systématique en faveur d'une méthode ou d'une autre.

Ces calculs font intervenir les quantités d'énergie importée, exportée et auto-consommée qui sont dépendantes du pas de temps de calcul (cf. Chapitre 3) et de la quantité d'énergie produite par les panneaux photovoltaïques et donc de la surface installée.

Pour mieux comprendre les enjeux des différentes méthodes, nous illustrons sur une maison individuelle de 139 m^2 , dont la consommation totale (Usages réglementaires + usages spécifiques) est de $99 \text{ kWh}_{EF}/(\text{m}^2.\text{an})$, l'évolution de la production photovoltaïque en fonction de la surface de modules installés. La figure 5.9 montre, pour une journée début février, la consommation de la maison et la production photovoltaïque pour différentes surfaces de modules. Cette dernière évolue bien au delà de la surface de la maison pour être représentative de cas où les panneaux seraient installés en dehors du bâtiment sur la parcelle. Pour les petites surfaces, toute la production va être auto-consommée et pour les plus grandes surfaces, c'est la part exportée qui croît.

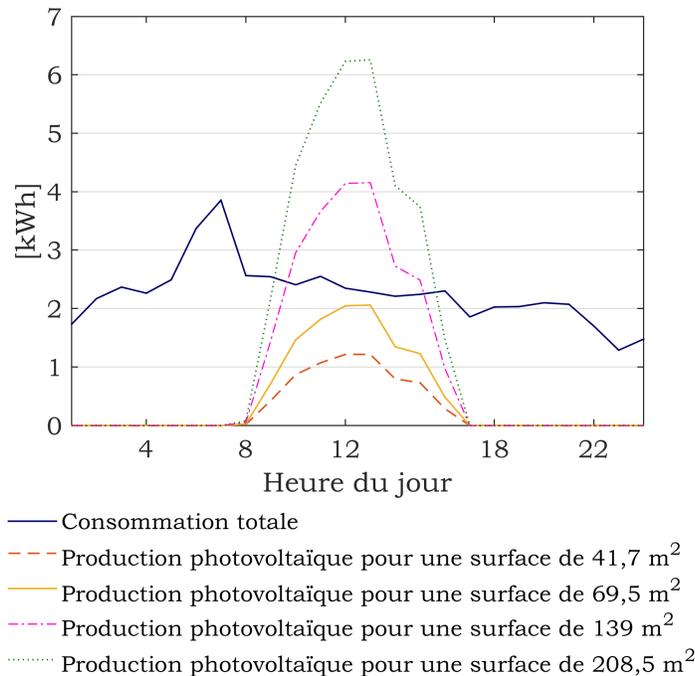


FIGURE 5.9 – Illustration de l'évolution de la production photovoltaïque en fonction de la surface installée par rapport à la consommation pour une journée d'hiver

La figure 5.10 illustre l'évolution des quantités d'énergie importée, exportée et auto-consommée en fonction de la surface de panneaux installés.

L'énergie importée décroît lentement avec la surface de PV installés pour atteindre une asymptote. L'énergie auto-consommée croît également lentement pour atteindre une asymptote. L'énergie exportée croît, quand à elle, linéairement avec la surface de PV installés. En effet, comme nous l'observons sur la figure 5.9, la production photovoltaïque va augmenter avec la surface installée mais ne produira pas plus quand le bâtiment en a besoin.

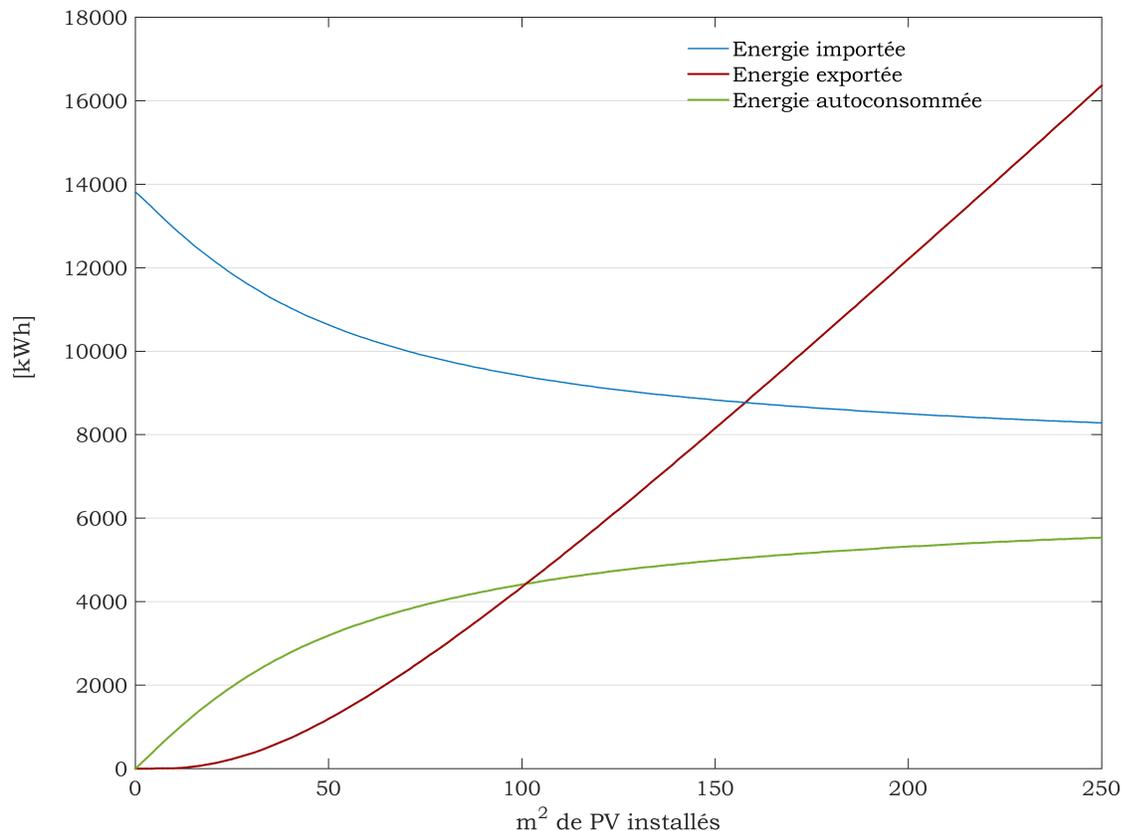


FIGURE 5.10 – Évolution des quantités d’énergie importée, exportée et auto-consommée en fonction de la surface de PV installés pour une maison individuelle de 139 m² (Calcul horaire agrégé sur une année)

La figure 5.11 montre l’évolution de l’impact sur le changement climatique du contributeur énergie (i.e. l’impact de l’électricité) et de la mise à disposition des panneaux photovoltaïques de la même maison pour les différentes méthodologies de prise en compte de la production locale d’énergie en fonction de la surface de PV installés.

Comme démontré précédemment, les méthodes d’impacts évités et des co-produits ont des impacts inférieurs ou égaux à ceux de la méthode de la norme.

Pour des petites surfaces de PV, c’est la méthode des co-produits qui donne les impacts les plus petits et donc qui avantage le plus le bâtiment producteur d’énergie par rapport à un bâtiment sans PV. Pour la méthode des impacts évités, les résultats diminuent avec la surface de PV installés et peuvent même devenir négatifs. Pour les deux autres méthodes, les résultats augmentent avec la surface de PV installés. *Ainsi, pour la méthode de la norme et des co-produits, à partir d’une certaine surface, il n’y a plus de gain environnemental à installer des panneaux photovoltaïques.* Ces méthodes peuvent donc être utilisées pour s’assurer que la surface de panneaux photovoltaïques installés soit raisonnable par rapport aux besoins du bâtiment.

Par ailleurs, comme nous l’avons vu à la section 3.2, les quantités d’énergie importée, exportée et auto-consommée sont fortement dépendantes du pas de temps utilisé pour le

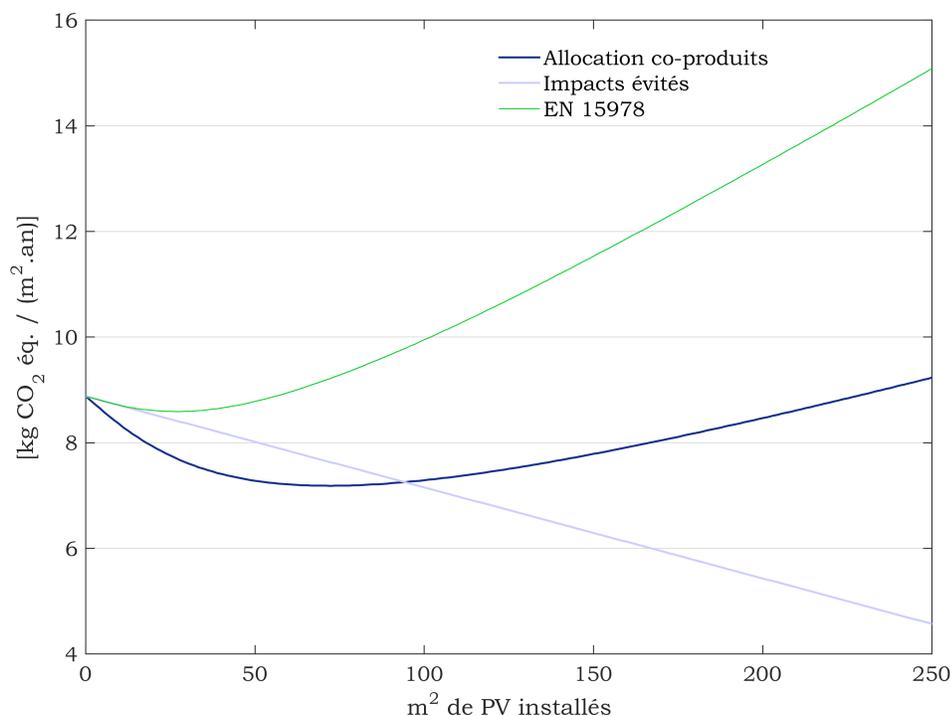


FIGURE 5.11 – Évolution de l’impact sur le changement climatique en fonction de la surface de PV pour les différentes méthodologies

calcul. Pour nos cas d’étude, nous choisissons donc de comparer le pas de temps qui correspond à la pratique actuelle, l’année, et celui qui pourraient être facilement utilisé, l’heure. De même, comme nous l’avons vu à la section 4.2.2.1 les impacts environnementaux du mix électrique peuvent être exprimés à l’heure, au lieu de l’année. Le tableau suivant présente donc les différentes configurations de calculs pour les principaux termes intervenant dans les équations 5.1 à 5.3.

TABLE 5.2 – Configurations de calcul pour les données énergétiques et les données environnementales du mix électrique

		Bilan import/export	
		Annuel	Horaire
Donnée environnementale du mix électrique	Annuelle	Cas A	Cas C
	Horaire	-	Cas B

5.2.1.1 Cas d’étude - Description

Le cas d’étude choisi est la maison BB (Béton banché) de la plateforme Incas (cf. section 4.3.2.1). Différentes alternatives sont testées : la maison sans PV, la maison avec 40 m² de PV et la maison équipée avec 40 m² de PV et 4 m² panneaux solaires thermiques (utilisés pour l’eau chaude sanitaire). Le premier cas est utilisé comme référence, le second est, pour

l'année considérée, représentatif d'un bâtiment "presque" zéro-énergie (nZEB *Nearly Zero Energy Building*) et le troisième d'un bâtiment à énergie positive (BEPOS).

5.2.1.1.1 Frontières du système

Nous prenons en compte dans cette ACV de bâtiment : les produits et matériaux de construction et les équipements (modules A, B et C de la norme EN 15978), les consommations d'eau (module B7) et d'énergie (réglementaires et spécifiques, module B6) lors de la phase d'usage. La durée de vie du bâtiment est fixée à 50 ans.

5.2.1.1.2 Consommations d'énergie pendant la phase d'usage

Le bilan énergétique est réalisé grâce à une SED réalisée sous COMFIE afin de fournir heure par heure les consommations (chauffage, eau chaude sanitaire, éclairage et électricité spécifique) et la production locale d'énergie. Pour s'assurer de la cohérence entre les données météo locales utilisées pour l'étude thermique et la météo nationale (qui influence le mix électrique) cette SED est réalisée avec des données météorologiques du Bourget-du-Lac de l'année 2012. Cette année est arbitrairement choisie car RTE fournit des données sur la production électrique française très détaillées pour l'année 2012 et nous disposons de données météorologiques pour cette localisation précise.

Nous avons pris en compte quatre habitants consommant chacun 100 L d'eau froide et 40 L d'eau chaude par jour (SOeS, 2010). Les besoins de chauffage sont assurés par des radiateurs électriques; l'eau chaude sanitaire par un ballon à accumulation fonctionnant la nuit. Pour l'alternative où des panneaux solaires thermiques sont utilisés, un chauffe-eau instantané est utilisé comme appoint. Pour les autres usages de l'énergie (éclairage, ventilation et usages domestiques), la consommation annuelle est fixée, à dire d'expert, à 2500 kWh_{EF}/an (Sidler, 2009a). Ils sont répartis de manière horaire sur l'année en fonction de l'occupation de la maison.

La consommation du chauffage est basse et égale à 7.5 kWh_{EF}/m²/an (énergie finale). Les besoins totaux en énergie finale du bâtiment sont de 52 kWh_{EF}/m²/an en 2012, 40 kWh_{EF}/m²/an quand la maison est équipée avec des panneaux solaires thermiques. La production PV annuelle est de 41 kWh/m²/an. La figure 5.12 représente la variabilité mensuelle de la consommation totale d'énergie et la production pour les deux alternatives considérées pour la maison : nZEB et BEPOS.

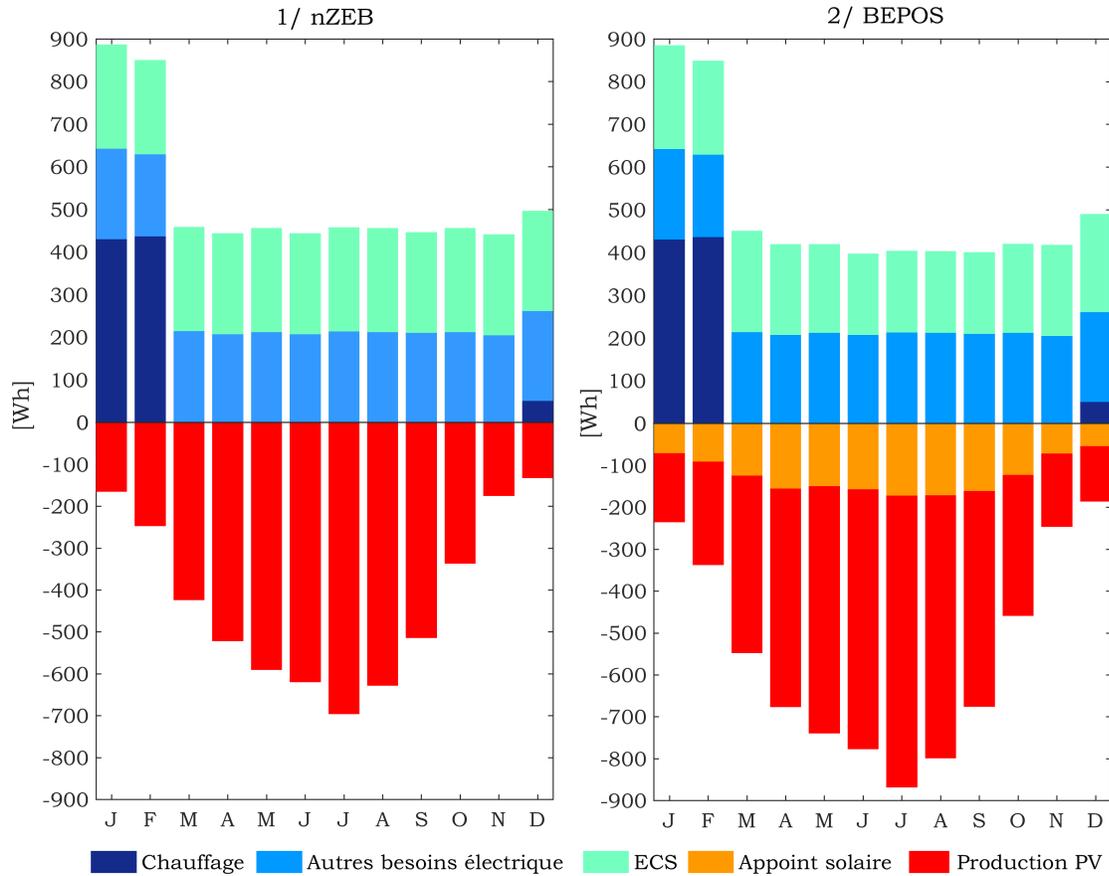


FIGURE 5.12 – Besoins et production moyens en énergie finale pour la maison INCAS BB en 2012 équipée de 1/ panneaux photovoltaïques et d’un ballon ECS à accumulation ou 2/ de panneaux photovoltaïques et solaires thermiques

5.2.1.1.3 Données environnementales

Concernant le mix électrique, nous utilisons les mix électriques horaire et annuel 2012 basés sur les données RTE et définis à la section 4.2.2.1.

Pour les produits de construction, les données d’ACV proviennent de la base INIES. Les durées de vie de chaque matériau sont celles spécifiées dans les FDES présentes sous INIES. Pour les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques les données sont issues de la base de donnée ecoinvent v2.2. Leur durée de vie est supposée être de 30 ans.

5.2.1.2 Résultats du cas d’étude

La figure 5.13 montre les résultats d’ACV pour le cas de référence (i.e. la maison BB sans panneaux solaires) calculés avec le mix électrique annuel et la consommation de 2012 (Cas C). La maison Incas étant une maison passive, sa consommation énergétique est réduite ; ainsi, celle-ci n’est un contributeur majeur que pour deux indicateurs : énergie non renouvelable (83 %) et déchets radioactifs (62 %). Cette consommation énergétique représente également une part non négligeable dans l’utilisation nette d’eau douce et le changement climatique, respectivement 42 % et 39 %.

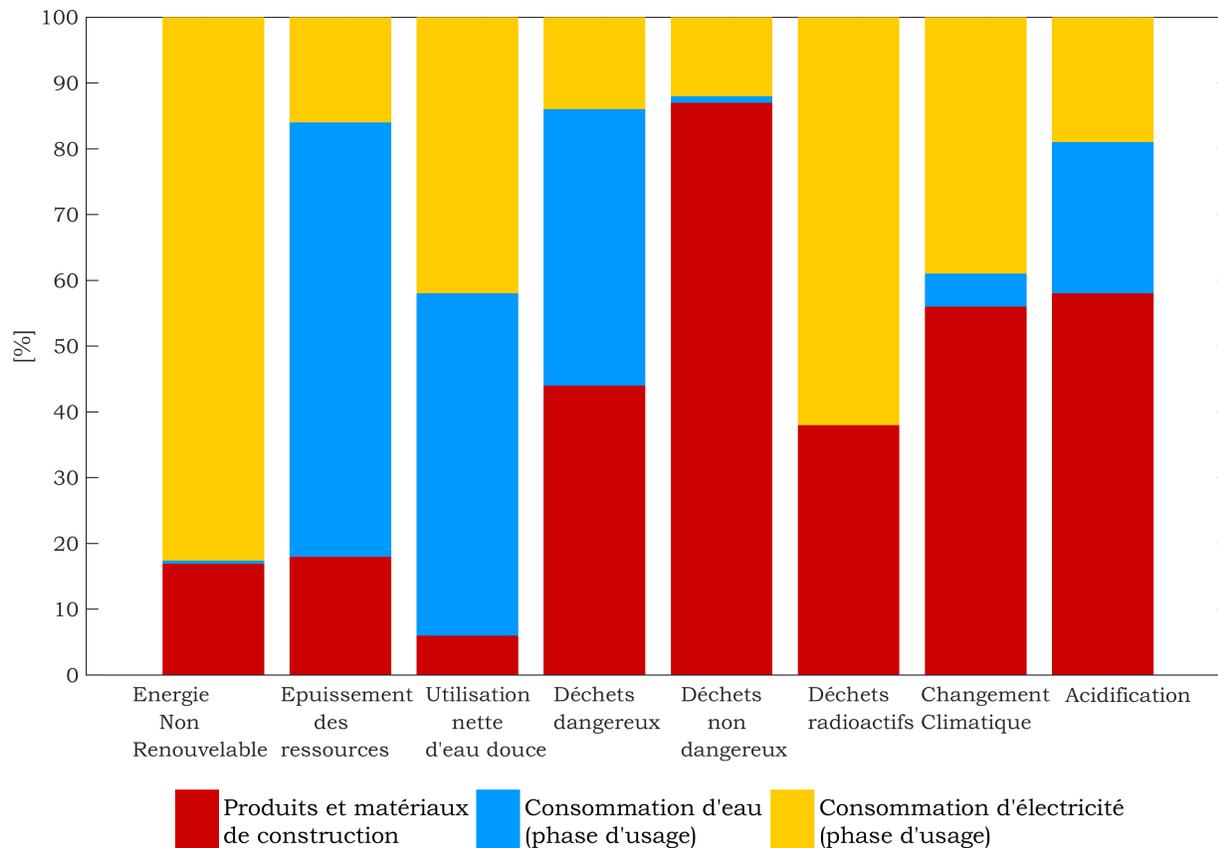


FIGURE 5.13 – Contribution relative aux différents impacts pour le cas de référence (Maison BB sans panneaux photovoltaïques) - Mix et consommation électrique annuel 2012 (Cas C)

Le tableau 5.3 présente les résultats des bilans énergétiques de chaque bâtiment calculés au niveau horaire et au niveau annuel. Comme on l'a observé précédemment, le pourcentage d'électricité auto-consommée est de 100 % sur l'année alors qu'avec un calcul horaire, ce pourcentage tombe à 22 % pour le nZEB et à 34 % pour le BEPOS.

TABLE 5.3 – Bilans énergétiques import-export annuel et horaire pour le nZEB et le BEPOS

		nZEB	BEPOS
Calcul annuel	Électricité auto-consommée [kWh]	5054	4923
	Électricité importé du réseau [kWh]	1241	0
	Électricité exporté sur le réseau [kWh]	0	131
	Pourcentage d'électricité auto-consommée	100 %	97 %
Calcul horaire	Électricité auto-consommée [kWh]	1121	1708
	Électricité importé du réseau [kWh]	5175	3215
	Électricité exporté sur le réseau [kWh]	3934	3346
	Pourcentage d'électricité auto-consommée	22 %	34 %

La figure 5.14 présente les résultats pour les cas A, B et C (cf. tableau 5.2) pour les trois méthodes de prise en compte de la production d'énergie sur site pour le cas de bâtiment zéro-énergie et le cas BEPOS.

Le cas B (bilan énergétique horaire et mix horaire) est, physiquement, le calcul le plus proche de la réalité. Dans les deux cas (nZEB et BEPOS), les différences sur les résultats entre les méthodes de prise en compte de l'énergie produite localement sont importantes.

Pour le nZEB, l'allocation des co-produits donne des résultats proches de ceux de la maison sans PV ; des résultats similaires sont obtenus avec la méthode de la norme EN 15978. Pour le BEPOS, les deux méthodes présentent des résultats quelques peu inférieurs à ceux de la maison sans PV, en particulier pour les indicateurs : énergie primaire non renouvelable, changement climatique et déchets radioactifs. Ces deux méthodes ne sont donc discriminantes pas pour motiver l'installation de production locale d'énergie.

Pour la méthode des impacts évités, quelque soit la configuration, les résultats sont très inférieures à ceux de la maison sans PV, notamment pour les indicateurs énergie non renouvelable et déchets radioactifs. En effet, la quantité d'énergie exportée est grande : pour le nZEB, elle correspond à plus de la moitié de l'électricité importée et BEPOS, la quantité d'électricité exportée est plus grande que la quantité importée. Ainsi, les impacts de la consommation d'électricité (cf. équation 5.3) sont réduits significativement par rapport à la maison sans PV.

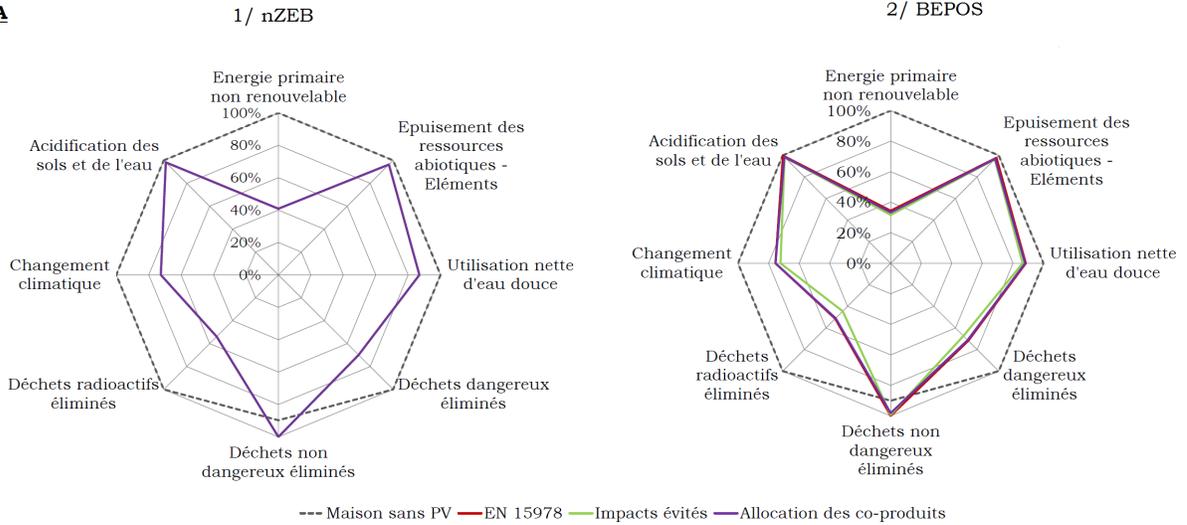
Pour le cas A (bilan énergétique annuel et mix annuel), les trois méthodes donnent les mêmes résultats quelque soit la configuration (nZEB ou BEPOS). En effet, la quantité d'énergie exportée est petite et le pourcentage d'énergie auto-consommée est proche de 100 %. Or, ces deux facteurs sont ceux qui induisent des différences entre les méthodes. Concernant la comparaison de variantes, toutes les méthodes montrent que la maison avec PV a un meilleur profil environnemental que la maison sans PV (à l'exception de l'indicateur déchets non dangereux).

Pour le cas C (bilan énergétique horaire et mix annuel), les différences entre les méthodologies sont plus petites que dans le cas B et les résultats sont quasiment similaires pour la maison nZEB que pour le cas de référence (sans PV). Pour la méthode des impacts évités, les résultats sont similaires à ceux obtenus au cas B. En effet, quand un mix annuel est utilisé, la différence entre la quantité d'électricité importée et exportée est réalisée annuellement et

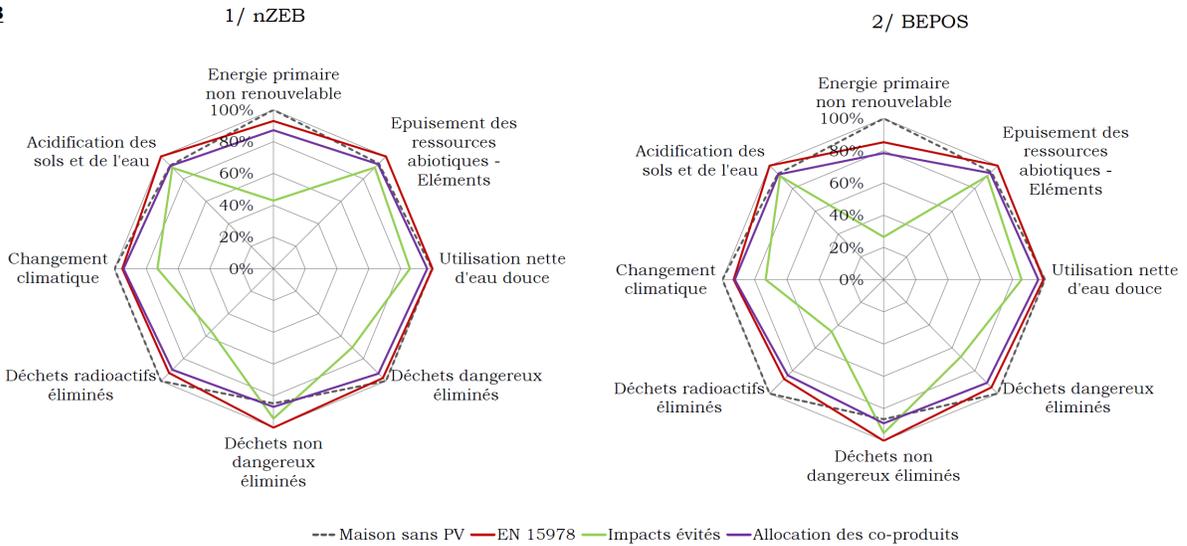
dans le cas du nZEB, cette différence est positive (cf. tableau 5.3). Autrement dit, avec ce calcul, le bâtiment est considéré comme un bâtiment qui importe de l'électricité, mais en très petite quantité.

Pour la configuration BEPOS, la différence entre énergie importée et exportée est négative (cf. tableau 5.3) donc le bâtiment apparaît bien comme exportateur et le profil environnemental obtenu avec la méthode des impacts évités est similaire à ceux obtenus avec les configurations de calcul A et B. Les deux autres méthodes donnent des résultats plus petits que ceux de la maison sans PV.

Cas A



Cas B



Cas C

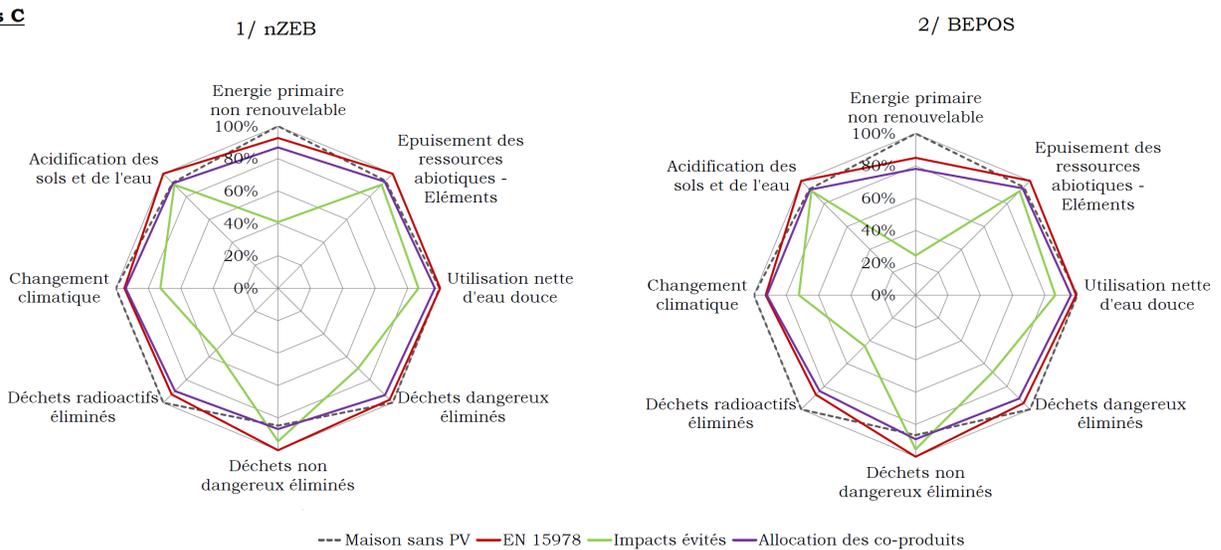


FIGURE 5.14 – Comparaison entre les différentes méthodologies de calculs : annuel (A), horaire (B) et bilan énergétique horaire et mix annuel (C) pour les deux configurations de la maison BB : nZEB et BEPOS. La maison sans PV est utilisée comme référence

Ainsi, il y a plus de différences entre les méthodologies pour le BEPOS que pour le bâtiment zéro énergie. Par ailleurs, les différences sont légèrement plus importantes entre la méthode des impacts évités et la méthode d'allocation des co-produits quand un mix électrique annuel est utilisé. Les indicateurs d'impacts pour lesquels les différences sont les plus critiques vis-à-vis de la méthodologie utilisée sont l'énergie non renouvelable, les déchets radioactifs et le changement climatique car ils sont les plus sensibles aux parts d'énergie nucléaire et de combustibles fossiles utilisés dans le mix électrique.

Comme nous l'avons vu précédemment, pour les bâtiments équipés de PV, il est important d'effectuer le bilan énergétique a minima au niveau horaire. Dans les chapitres précédents, nous avons vu qu'un mix électrique horaire n'est pas indispensable pour calculer les impacts de l'électricité importée du réseau pour les bâtiments neufs. Nous retrouvons cette conclusion pour les trois méthodes où les résultats changent peu entre les cas B (mix horaire) et C (mix annuel).

Pour les différentes méthodologies, entre la maison avec ou sans PV, les trois méthodes donnent le même résultat : la maison avec production photovoltaïque a un meilleur profil environnemental. Cependant, les résultats numériques sont très différents et le choix de la méthodologie sera avant tout un choix politique.

En effet, chaque méthode a ses propres justifications. La méthode de la norme EN 15978 donne des avantages au bâtiment exportant de l'énergie et d'autres avantages à celui utilisant cette énergie exportée (via l'indicateur d'énergie renouvelable). L'allocation des co-produits égalise les impacts entre le bâtiment produisant l'énergie et celui l'utilisant. Pour la méthode des impacts évités, le bâtiment produisant de l'énergie est pris en compte sans considérer de relations avec les bâtiments environnants. Tous les impacts et bénéfices sont alloués au bâtiment producteur, suivant l'idée que le décideur (celui qui choisit d'installer les panneaux photovoltaïques) est celui qui est responsable des impacts et des bénéfices associés.

Au niveau des résultats, cela se traduit par les résultats les plus faibles pour la méthode des impacts évités pour les indicateurs suivants : Energie non renouvelable (autour de 40 % pour la maison avec PV vs. 100 % pour la maison sans PV), Changement Climatique (autour de 70 % pour la maison avec PV), Déchets Radioactifs (autour de 55 % pour la maison avec PV) et Consommation d'eau (autour de 70 % pour la maison avec PV). Au contraire, les méthodes EN 15978 et la méthode d'allocations des co-produits ont des résultats similaires : la maison avec PV a des impacts environ 20 % inférieurs à ceux de la maison sans PV.

Ainsi, la méthode des impacts évités semble adaptée pour développer de manière offensive la production locale d'énergie sur les parcelles des bâtiments. Les deux autres méthodes permettent d'inciter la mise en place de production locale d'énergie tout en ayant un garde de fou contre ceux qui voudrait utiliser seulement cette technologie pour réduire leurs impacts environnementaux.

Dans la section suivante, nous allons nous intéresser à l'application de ces méthodes à l'échelle d'un îlot constitué de bâtiments producteurs d'énergie et plus particulièrement à leur adéquation avec le principe de modularité.

5.2.2 Prise en compte de la production locale à l'échelle de l'îlot

Comme nous l'avons vu à la section 3.3, il existe différentes manières de réaliser le bilan énergétique d'un ensemble de bâtiments : à l'échelle de l'îlot ou bâtiment par bâtiment en prenant la mutualisation des usages en compte ou pas.

Par ailleurs, l'ACV bâtiment est aujourd'hui basée sur le principe de modularité (Schmincke, 2011) i.e. les déclarations environnementales à l'échelle produit sont utilisées comme données d'entrée de l'évaluation environnementale à l'échelle bâtiment. Si ce principe est étendu à plus grande échelle, l'évaluation environnementale bâtiment par bâtiment et celle de l'îlot devraient donner les mêmes résultats.

Nous allons donc appliquer les différentes méthodes pour la gestion de l'export d'énergie à l'îlot de bâtiments producteurs d'énergie présenté à la section 3.3 pour tester leur adéquation avec le principe de modularité.

5.2.2.1 Les différentes méthodes de calcul

Par rapport aux configurations de calculs utilisées pour la comparaison à l'échelle bâtiment, nous nous placerons toujours dans le cas B i.e. un bilan import/export horaire et une donnée environnementale horaire. C'est la configuration qui permet le calcul le plus précis. Les paragraphes suivants détaillent le calcul pour un îlot de bâtiments équipés de PV pour les trois méthodologies et les différentes échelles.

5.2.2.1.1 Évaluation environnementale à l'échelle de l'îlot

À l'échelle de l'îlot, nous pouvons reprendre les équations 5.1 à 5.3 pour écrire par extrapolation :

— Pour la norme EN 15978 :

$$\overrightarrow{I}_{\text{îlot}} = E_{\text{importée}_{\text{îlot}}} \times \overrightarrow{I}_{\text{mix}} + \overrightarrow{I}_{\text{PV}_{\text{îlot}}} + \overrightarrow{I}_{\text{autres}} \quad (5.4)$$

— Pour la méthode des co-produits :

$$\overrightarrow{I}_{\text{îlot}} = E_{\text{importée}_{\text{îlot}}} \times \overrightarrow{I}_{\text{mix}} + \frac{E_{\text{autoconsommée}_{\text{îlot}}}}{E_{\text{produite,PV}_{\text{îlot}}}} \times \overrightarrow{I}_{\text{PV}_{\text{îlot}}} + \overrightarrow{I}_{\text{autres}} \quad (5.5)$$

— Pour la méthode des impacts évités :

$$\overrightarrow{I}_{\text{îlot}} = (E_{\text{importée}_{\text{îlot}}} - E_{\text{exportée}_{\text{îlot}}}) \times \overrightarrow{I}_{\text{mix}} + \overrightarrow{I}_{\text{PV}_{\text{îlot}}} + \overrightarrow{I}_{\text{autres}} \quad (5.6)$$

$\overrightarrow{I}_{\text{îlot}}$ est le vecteur des impacts environnementaux de l'îlot sur l'ensemble de son cycle de vie
 $E_{\text{importée}_{\text{îlot}}}$ est la quantité d'électricité importée du réseau électrique calculée à l'échelle de l'îlot

$E_{\text{autoconsommée}_{\text{îlot}}}$ est la quantité d'électricité photovoltaïque utilisée dans l'îlot

$E_{\text{produite,PV}_{\text{îlot}}}$ est la quantité d'électricité produite par tous les panneaux photovoltaïques de l'îlot

$E_{\text{exportée}_{\text{îlot}}}$ est la quantité d'électricité exportée vers le réseau électrique

$\overrightarrow{PV_{\text{îlot}}}$ est le vecteur des impacts environnementaux de la mise à disposition des panneaux photovoltaïques

$\overrightarrow{I_{\text{autres}}}$ est le vecteur des impacts environnementaux des autres contributeurs (matériaux et produits de construction, autres énergies, eau, chantier, déchets) pour tout l'îlot.

5.2.2.1.2 Évaluation environnementale bâtiment par bâtiment

Pour l'évaluation bâtiment par bâtiment, il faut choisir si nous nous basons sur un bilan énergétique qui prend en compte ou non la mutualisation des usages. Par mutualisation, nous nous référons, ici, à la capacité des bâtiments à échanger de l'énergie entre eux.

Sans mutualisation

Si la mutualisation des usages n'est pas prise en compte, nous pouvons reprendre les équations 5.1 à 5.3 pour chaque bâtiment i et sommer le tout pour obtenir les résultats à l'échelle de l'îlot, soient :

— Pour la norme EN 15978 :

$$\overrightarrow{I_{\text{îlot}}} = \sum_i E_{\text{importée}_i} \times \overrightarrow{I_{\text{mix}}} + \sum_i \overrightarrow{IPV_i} + \sum_i \overrightarrow{I_{\text{autres}_i}} \quad (5.7)$$

— Pour la méthode des co-produits :

$$\overrightarrow{I_{\text{îlot}}} = \sum_i E_{\text{importée}_i} \times \overrightarrow{I_{\text{mix}}} + \sum_i \frac{E_{\text{autoconsommée}_i}}{E_{\text{produite},PV_i}} \times \overrightarrow{IPV_i} + \sum_i \overrightarrow{I_{\text{autres}_i}} \quad (5.8)$$

— Pour la méthode des impacts évités :

$$\overrightarrow{I_{\text{îlot}}} = \sum_i (E_{\text{importée}_i} - E_{\text{exportée}_i}) \times \overrightarrow{I_{\text{mix}}} + \sum_i \overrightarrow{IPV_i} + \sum_i \overrightarrow{I_{\text{autres}_i}} \quad (5.9)$$

Avec mutualisation

Quand la mutualisation est prise en compte, nous reprenons le bilan énergétique défini à la section 3.3. Nous distinguons alors l'énergie consommée localement (importée ou exportée selon le bâtiment) de celle importée ou exportée de l'extérieur. De plus, pour la méthode des co-produits, la fraction d'électricité auto-consommée doit être prise en compte. Ici, nous faisons l'hypothèse que tous les bâtiments sont reliés au même point du réseau électrique. Les différents bilans environnementaux peuvent donc s'écrire :

— Pour la norme EN 15978 :

$$\overrightarrow{I_{\text{îlot}}} = \sum_i E_{\text{importée}_i}^{\text{ext}} \times \overrightarrow{I_{\text{mix}}} + \sum_i \overrightarrow{IPV_i} + \sum_i \overrightarrow{I_{\text{autres}_i}} \quad (5.10)$$

— Pour la méthode des co-produits :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{I_{\text{îlot}}} = & \sum_i E_{\text{importée}_i}^{\text{ext}} \times \overrightarrow{I_{\text{mix}}} + \sum_i \left(\frac{E_{\text{autoconsommée}_i}}{E_{\text{produite},PV_i}} \times \overrightarrow{IPV_i} + \right. \\ & \left. \sum_{\substack{j \\ j \neq i}} \frac{E_{\text{exportée}_j}^{\text{loc}}}{E_{\text{produite},PV_j}} \times \overrightarrow{IPV_j} \times \frac{E_{\text{importée}_i}^{\text{loc}}}{\sum_{\substack{j \\ j \neq i}} E_{\text{produite},PV_j}} \right) + \sum_i \overrightarrow{I_{\text{autres}_i}} \end{aligned} \quad (5.11)$$

— Pour la méthode des impacts évités :

$$\overrightarrow{I}_{\text{îlot}} = \sum_i (E_{\text{importée}_i}^{\text{ext}} - E_{\text{exportée}_i}^{\text{ext}}) \times \overrightarrow{I}_{\text{mix}} + \sum_i \overrightarrow{I}_{\text{PV}_i} + \sum_i \overrightarrow{I}_{\text{autres}_i} \quad (5.12)$$

$E_{\text{importée}_i}^{\text{ext}}$ est la quantité d'électricité importée du réseau électrique calculée pour chaque bâtiment

$E_{\text{autoconsommée}_i}$ est la quantité d'électricité photovoltaïque utilisée par le bâtiment i et provenant du PV installé sur ce même bâtiment

$E_{\text{exportée}_j}^{\text{loc}}$ est la quantité d'électricité exportée localement par le bâtiment j

$E_{\text{importée}_i}^{\text{loc}}$ est la quantité d'électricité locale importée par le bâtiment i

5.2.2.2 Application à un îlot de bâtiments producteurs d'énergie

Le cas d'étude choisi, ici, est l'îlot constitué de bâtiments producteur d'énergie et présenté à la section 3.3.

5.2.2.2.1 Description

Pour l'ACV des différents bâtiments, nous considérons un périmètre restreint : les produits et matériaux de construction et équipements (modules A, B et C de la norme EN 15978) et les consommations d'énergie lors de la phase d'usage (module B6). La durée de vie des bâtiments a été fixée à 50 ans.

Par soucis de simplification, les produits et matériaux de construction n'ayant pas de lien avec la performance énergétique ont été modélisés en utilisant les valeurs médianes d'impacts environnementaux identifiées lors de l'analyse statistique des expérimentations HQE Performance (Lebert *et al.*, 2013), pour la typologie concernée.

Pour les autres produits de construction et équipements, la modélisation est basée sur les descriptions techniques et quantitatives utilisées pour les modélisations énergétiques. Les données environnementales associées sont soit des FDES de la base INIES, soit des données génériques du logiciel ELODIE, soit des données environnementales de la base ecoinvent.

Concernant les panneaux photovoltaïques, la donnée environnementale utilisée est la donnée générique du logiciel ELODIE du CSTB. La donnée environnementale générique pour le mètre carré de panneaux photovoltaïques est représentative d'une moyenne de huit différentes technologies existantes, détaillées ci-dessous. Ces données environnementales moyennées sont issues de la base de données ecoinvent v2.01 et sont représentatives de la fabrication d'installations de 3 kWc. Ces données comprennent l'interface électrique et l'onduleur, l'interface mécanique d'installation et les panneaux photovoltaïques :

- Installation résidentielle 3 kWc de PV silicium mono-cristallin laminés intégrée en façade (22,071 m²)
- Installation résidentielle 3 kWc de PV silicium mono-cristallin montée en façade (22,071 m²)
- Installation résidentielle 3 kWc de PV silicium multi-cristallin laminés intégrée en façade (23,474 m²)

- Installation résidentielle 3 kWc de PV silicium multi-cristallin montée en façade (23,474 m²)
- Installation résidentielle 3 kWc de panneaux photovoltaïques silicium amorphe laminé intégrée en toiture inclinée (47,907 m²)
- Installation résidentielle 3 kWc de panneaux photovoltaïques silicium amorphe montée en toiture inclinée (47,907 m²)
- Installation résidentielle 3 kWc de panneaux photovoltaïques Si mono-cristallin laminés intégrée en toiture inclinée (22,071 m²)
- Installation résidentielle 3 kWc de panneaux photovoltaïques silicium mono-cristallin montée en toiture inclinée (22,071 m²)
- Installation résidentielle 3 kWc de panneaux photovoltaïques silicium multi-cristallin laminés intégrée en toiture inclinée (23,474 m²)
- Installation résidentielle 3 kWc de panneaux photovoltaïques silicium multi-cristallin montée en toiture inclinée (23,474 m²)

Des coefficients majorants ont été appliqués pour le calcul des valeurs des impacts environnementaux de ces systèmes :

- un coefficient correcteur pour prendre en compte les étapes (transport, mise œuvre, vie en œuvre, fin de vie), et les emballages du produit, les produits complémentaires et le taux de chute, non inclus dans les données d'ACV utilisées ;
- un coefficient de sécurité pour pallier la faible représentativité de la donnée ACV (représentativité géographique, technologique et temporelle).

Une des limites de l'utilisation de cette donnée est la linéarité supposée entre l'augmentation de la surface et de la puissance crête installée et la quantité des équipements ; e.g. la puissance crête est doublée, deux onduleurs ne seront pas installés mais un seul d'une plus grande capacité.

Concernant le mix électrique, nous utilisons les mix électriques horaire et annuel 2012 basés sur les données RTE et définis à la section 4.2.2.1.

Pour les autres énergies, la donnée environnementale du kWh de gaz naturel a été calculée à partir du module « 403I Natural Gas : Combustion » issue de la base de données DEAM et les données environnementales utilisées pour le bois-énergie sont issues de différents modules de la base ecoinvent v2.2.

5.2.2.2.2 Résultats

Les tableaux 5.4, 5.5 et 5.6 présentent, respectivement, pour la méthode de la norme EN 15978, l'allocation des co-produits et la méthode des impacts évités les résultats ACV à l'échelle de l'îlot pour les différentes configurations de calcul.

Pour la méthode de la norme EN 15978, nous observons que le principe de modularité est conservé quand la mutualisation est considérée c'est-à-dire que l'évaluation environnementale à l'échelle de l'îlot donne les mêmes résultats que l'évaluation environnementale bâtiment par bâtiment avec prise en compte de la mutualisation. Quand la mutualisation des usages n'est pas prise en compte, la différence avec l'évaluation à l'échelle de l'îlot est faible : elle ne dépasse pas 3 %. Cependant, ce résultat est à nuancer : dans notre exemple, la quantité d'électricité échangée entre les bâtiments est faible (5 % de la production totale).

TABLE 5.4 – Méthode de la norme EN 15978 : Résultats d’ACV à l’échelle de l’îlot pour les différentes configurations spatiales de calcul (îlot, bâtiments par bâtiments avec et sans mutualisation)

Indicateurs	Unité	Îlot	Sans mutualisation	Avec mutualisation
Énergie primaire non renouvelable	kWh	5.06×10^7	5.22×10^7	5.06×10^7
Changement Climatique	kg éq. CO ₂	4.14×10^6	4.19×10^6	4.14×10^6
Utilisation nette d’eau douce	L	1.19×10^8	1.23×10^8	1.19×10^8
Déchets dangereux	kg	4.31×10^5	4.31×10^5	4.31×10^5
Déchets non dangereux	kg	6.68×10^6	6.71×10^6	6.68×10^6
Déchets radioactifs	kg	2.32×10^3	2.40×10^3	2.32×10^3
Épuisement des ressources abiotiques	kg éq. Sb	1.52×10^4	1.57×10^4	1.52×10^4
Acidification	kg éq. SO ₂	2.41×10^4	2.44×10^4	2.41×10^4

Pour la méthode des co-produits, les résultats sont similaires à ceux de la norme i.e. le principe de modularité est respecté quand la mutualisation des usages est prise en compte. De même, la différence avec l’évaluation à l’échelle de l’îlot quand la mutualisation n’est pas prise en compte ne dépasse pas 3 % et est donc faible.

Enfin, pour la méthode des impacts évités, le principe de modularité est respecté que la mutualisation soit prise en compte ou non.

Pour la différence entre les méthodologies de prise en compte de la production locale d’énergie, à l’échelle de l’îlot, nous retrouvons des observations valables à l’échelle bâtiment : la méthode des impacts évités donne toujours les résultats les plus petits de 30 %, en particulier, pour les indicateurs énergie primaire non renouvelable et déchets radioactifs. L’indicateur utilisation nette d’eau douce présente également de grandes disparités (écart de 30 % entre les méthodes) mais ici, nous n’avons pas modélisé le contributeur "consommations d’eau lors de la phase d’usage".

TABLE 5.5 – Méthode des co-produits : résultats d’ACV à l’échelle de l’îlot pour les différentes configurations spatiales

Indicateurs	Unité	Îlot	Sans mutualisation	Avec mutualisation
Énergie primaire non renouvelable	kWh	4.86×10^7	5.01×10^7	4.86×10^7
Changement Climatique	kg éq.CO ₂	3.66×10^6	3.67×10^6	3.65×10^6
Utilisation nette d’eau douce	L	1.13×10^8	1.16×10^8	1.13×10^8
Déchets dangereux	kg	4.29×10^5	4.29×10^5	4.29×10^5
Déchets non dangereux	kg	6.06×10^6	6.03×10^6	6.05×10^6
Déchets radioactifs	kg	2.25×10^3	2.33×10^3	2.25×10^3
Épuisement des ressources abiotiques	kg éq. Sb	1.21×10^4	1.22×10^4	1.20×10^4
Acidification	kg éq. SO ₂	2.18×10^4	2.18×10^4	2.17×10^4

TABLE 5.6 – Méthode des impacts évités : résultats d’ACV à l’échelle de l’îlot pour les différentes configurations spatiales

Indicateurs	Unité	Îlot	Sans mutualisation	Avec mutualisation
Énergie primaire non renouvelable	kWh	3.54×10^7	3.54×10^7	3.54×10^7
Changement Climatique	kg éq.CO ₂	3.62×10^6	3.62×10^6	3.62×10^6
Utilisation nette d’eau douce	L	8.35×10^7	8.35×10^7	8.35×10^7
Déchets dangereux	kg	4.28×10^5	4.28×10^5	4.28×10^5
Déchets non dangereux	kg	6.38×10^6	6.38×10^6	6.38×10^6
Déchets radioactifs	kg	1.58×10^3	1.58×10^3	1.58×10^3
Épuisement des ressources abiotiques	kg éq. Sb	1.11×10^4	1.11×10^4	1.11×10^4
Acidification	kg éq. SO ₂	2.12×10^4	2.12×10^4	2.12×10^4

5.2.3 Conclusions

Dans cette section, nous nous sommes intéressés à l'influence des méthodes de prise en compte de la production locale d'énergie sur les résultats d'ACV à l'échelle du bâtiment et de l'îlot. Nous avons vu que les différences entre la méthode des impacts évités et les deux autres méthodes sont significatives pour les indicateurs énergie primaire non renouvelable et déchets radioactifs.

La méthode des impacts évités donne des résultats plus faibles et favorisera donc l'installation de productions décentralisées associées aux bâtiments tandis que les autres apporteront des gains plus limités. Le choix de cette méthode jouera donc un rôle prépondérant pour accompagner les décisions politiques liées au développement des énergies renouvelables.

A l'échelle de l'îlot, la mutualisation des usages doit être prise en compte pour les méthodes de la norme EN 15978 et des co-produits pour respecter le principe de modularité. La méthode des impacts évités, quant à elle, respecte le principe de modularité quelque soit la manière de réaliser le bilan énergétique de l'îlot.

5.3 Synthèse et conclusions

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux résultats d'ACV i.e. les impacts environnementaux du contributeur énergie et ceux de l'ensemble du bâtiment.

Tout d'abord, bien que le mix électrique présente de grandes variations temporelles, ces dernières ont peu d'influence sur les résultats à l'échelle bâtiment. Plus particulièrement, les valeurs de référence des impacts environnementaux de différentes typologies de bâtiment, calculées lors du projet HQE Performance, sont peu dépendantes des variations temporelles du mix électrique.

Néanmoins, dans le cadre d'une réglementation, il semble impératif de fixer une donnée environnementale conventionnelle par vecteur énergétique.

Cette étude sur la sensibilité des résultats et les incertitudes liées aux données environnementales, sur les énergies ou les composants, doit être poursuivie pour apporter la fiabilité nécessaire aux acteurs.

Concernant les méthodes de prise en compte de l'export d'énergie, à ce jour, trois sont utilisées en ACV : la méthode de la norme européenne, celle des co-produits et celle des impacts évités. Nous avons montré que cette dernière est celle qui donne les impacts les plus faibles et favorisera donc le plus l'implémentation de production locale d'énergie. Elle respecte également le principe de modularité à l'échelle de l'îlot, quelle que soit la manière de réaliser le bilan énergétique (avec ou sans mutualisation). Cette méthode considère que c'est le concepteur du bâtiment qui est responsable des impacts et des bénéfices liés à l'installation de PV.

Pour les deux autres méthodes, le gain environnemental lié à la production locale d'énergie est plus restreint et à l'échelle de l'îlot, elles ne respectent le principe de modularité que si la mutualisation est prise en compte dans le bilan énergétique. Cependant, elles permettent de partager le gain environnemental entre tous les bâtiments. La méthode de la norme EN 15978 considère que la totalité des impacts du système de production locale est affectée au bâtiment pour appliquer le même principe qu'aux autres produits et matériaux de construction. Un avantage est alloué au concepteur en diminuant la quantité d'énergie consommée par le bâtiment de celle auto-consommée. La méthode des co-produits considère, quant à elle, que les impacts et les bénéfices des systèmes de production locale sont imputables aussi bien au concepteur du bâtiment qui les héberge qu'à celui d'un autre bâtiment qui va les utiliser.

Une perspective pour s'abstraire de ces problématiques d'allocation serait de séparer l'évaluation de la performance environnementale du bâtiment et celle du système de production locale d'énergie. La fonction de production d'énergie serait alors évaluée à part et sa performance environnementale serait exprimée en fonction du kWh produit.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif de cette thèse a été d'étudier et d'améliorer la méthodologie d'analyse de cycle de vie bâtiment, en se focalisant sur le calcul des impacts environnementaux de la consommation d'énergie en phase exploitation : plus particulièrement, de déterminer les spécifications nouvelles à prendre en compte pour les bâtiments et les îlots de demain et à réinterroger les pratiques actuelles pour toutes les constructions.

La première problématique était la récupération d'informations pertinentes pour réaliser des analyses de cycle de vie des consommations d'énergie des bâtiments à partir des résultats de simulation énergétique dynamique ou de calculs réglementaires. Pour les bâtiments sans production locale d'énergie, les consommations d'énergie sont facilement extraites, au niveau horaire ou au niveau annuel, des simulations énergétiques dynamiques ou du calcul réglementaire. Lorsque de la production locale d'énergie doit être considérée, une distinction entre parts d'énergie importée, exportée et auto-consommée doit être effectuée.

Grâce à des bâtiments et à leurs courbes de charge, mesurées et génériques, et une modélisation de la production photovoltaïque, nous avons montré que ce bilan import-export doit être effectué *a minima* au niveau horaire. En effet, sur nos différents cas d'études, un bilan annuel ne permet pas de prendre en compte les échanges réels entre le réseau et le bâtiment. Si les simulations énergétiques évoluent vers un pas de temps de calcul plus fin, le bilan import-export gagnera également à être calculé avec ce pas de temps pour réduire l'incertitude sur le calcul des parts d'énergie importée, exportée et auto-consommée.

Par ailleurs, lorsque l'échelle d'évaluation est celle de l'îlot, le bilan énergétique peut s'effectuer de trois manières différentes : pour l'îlot dans sa globalité, bâtiment par bâtiment sans prendre en compte la mutualisation des usages ou bâtiment par bâtiment en prenant en compte la mutualisation des usages. Nous avons montré sur un cas d'étude constitué de bâtiments à énergie positive que les différences entre ces bilans étaient faibles. Ce choix du bilan énergétique n'est pourtant pas anodin. En effet, certaines associations de bilan énergétique et de méthodologie pour la prise en compte de l'export d'énergie en analyse de cycle de vie peuvent conduire à un non respect du principe de modularité entre bâtiments et îlot.

La deuxième problématique était liée aux caractéristiques temporelles des données environnementales des vecteurs énergétiques. Nous nous sommes particulièrement intéressés à la prise en compte des variations des sources d'approvisionnement ou de production à court terme du gaz et de l'électricité.

Pour disposer d'une donnée pertinente pour le gaz, la prise en compte des variations des sources d'approvisionnement n'est, à ce jour, pas nécessaire. En effet, sur différentes typologies de bâtiments, l'utilisation d'un mix gazier mensuel (i.e. dans lequel on a considéré la variation

mensuelle des sources d’approvisionnement) n’apportait pas une précision significative sur les résultats par rapport à un mix annuel.

Pour l’électricité, les variations temporelles, inférieures à l’année, des moyens de production ne sont importantes que pour des bâtiments anciens (non rénovés) avec du chauffage électrique. Pour les différents cas de bâtiments testés, la différence entre mix électrique horaire et mix annuel n’était significative que pour ce type de bâtiments.

Cependant, nous devons rappeler que ces observations, que ce soit pour le gaz ou pour l’électricité, sont susceptibles d’évoluer si les incertitudes des méthodes d’évaluation des impacts diminuent ou encore si les usages des bâtiments (types d’énergie consommée, distribution temporelle) ou les technologies mises en œuvre changent.

En effet, pour l’évaluation des technologies de maîtrise de la demande d’énergie, la modélisation actuelle du mix électrique, même si elle est temporelle, est limitée car elle ne permet pas de rendre compte des effets de l’effacement sur le mix électrique, tels que la diminution de la pointe de demande ou l’arrêt d’une centrale de production. Des recherches sur les interactions entre réseau énergétique et parc de bâtiments doivent être entreprises pour développer des modélisations et des indicateurs permettant de traduire sur un bâtiment une amélioration impactante à l’échelle du réseau national.

Nous avons également montré que l’influence de la variabilité temporelle du mix électrique est réduite à l’échelle des résultats d’analyse de cycle de vie du bâtiment. De plus, dans la perspective d’une approche performantielle, les valeurs représentatives d’un panel de bâtiments neufs sont peu impactées par cette variabilité. Cependant, fixer une donnée environnementale par vecteur énergétique pour la réglementation reste impératif pour améliorer la reproductibilité des résultats.

En complément, nous nous sommes intéressés aux variations à long terme du mix électrique et à la prise en compte du temps dans l’évaluation de l’impact sur le changement climatique. Ces considérations ne changent pas les conclusions d’une comparaison entre bâtiments dans une approche de conception mais elles ont une influence sur la valeur absolue des résultats et leur expression. Dans la perspective d’une approche performantielle, des seuils calculés avec une approche statique ne peuvent donc pas être utilisés avec des calculs réalisés avec une approche prospective ou des facteurs de caractérisation dynamiques.

Ainsi, aujourd’hui, ces éléments ne sont pas déterminants pour l’éco-conception et l’évaluation des bâtiments. Par exemple, ces considérations ne sont pas prioritaires pour être incluses dans une réglementation sur l’évaluation environnementale des bâtiments. Néanmoins, une veille sur ces deux éléments doit être effectuée pour qu’ils soient éventuellement intégrés dans des futures mises à jour de la réglementation.

La dernière problématique traitait de l’influence de choix méthodologiques sur les résultats d’analyse de cycle de vie. Nous avons concentré notre attention sur les méthodes de prise en compte de l’énergie exportée et des moyens de production locaux. Elles ont une influence non négligeable sur le bilan environnemental du bâtiment et sa perception (meilleur ou non qu’un bâtiment sans production locale d’énergie). La méthode des impacts évités est la méthode favorisant le plus l’installation de production d’énergie décentralisée. Les deux autres méthodes font aussi apparaître des gains environnementaux, mais plus restreints, au bâtiment équipé de production locale par rapport au bâtiment sans production. Pour l’évolution d’un îlot de bâtiments, la méthode des impacts évités respecte le principe de modularité à l’échelle de

l'ilot quelle que soit la manière de réaliser le bilan énergétique (avec ou sans mutualisation). Pour les deux autres méthodes, le bilan énergétique doit prendre en compte la mutualisation des usages pour que le principe de modularité soit respecté mais elles permettent de traduire cette mutualisation sur le bilan environnemental de chaque bâtiment.

Une autre voie serait de séparer l'évaluation de la performance environnementale du bâtiment et celle du moyen de production locale d'énergie. Cela pourrait permettre de s'abstraire de ces problématiques méthodologiques. La fonction de production d'énergie serait évaluée à part et sa performance environnementale serait exprimée en fonction du kWh produit. L'énergie produite pourrait alors être comparée à celle produite au niveau national et tenir compte de la variation d'ensoleillement en France comme cela est fait dans l'étude de Blanc *et al.* (2008).

Ainsi, cette thèse basée sur des considérations scientifiques et des applications dans un cadre pratique permet d'apporter des éléments justificatifs pour la formulation d'une approche obligatoire et performantielle pour la future réglementation.

Des recherches sont encore nécessaires pour mieux comprendre les interactions entre réseau énergétique et bâtiment et leurs influences sur la performance environnementale de ce dernier. De plus, pour les bâtiments neufs la part des usages spécifiques de l'énergie est de plus en plus importante dans les consommations ; l'étude de leurs influences sur les résultats d'analyse de cycle de vie est à entreprendre. Par ailleurs, les conclusions précédentes sont dépendantes des incertitudes liées au calcul des indicateurs d'impacts. Leurs robustesses doivent être encore améliorées et pour l'analyse de cycle de vie bâtiment, des études sur la sélection d'indicateurs, en fonction de leur pertinence, pour faire des choix pourraient être envisagées. Enfin, des recherches sur la variabilité des résultats de simulation énergétique dynamique ont déjà été menées (Goffart, 2013) mais une caractérisation des incertitudes sur le contributeur énergie est nécessaire pour compléter les travaux de Hoxha (2015).

A mesure que la performance énergétique augmente, il devient de plus en plus difficile de différencier les solutions technologiques utilisées pour diminuer les impacts. La réglementation devra donc trouver un compromis entre une approche conventionnelle et une valorisation des innovations.

Bibliographie

- (2005). Programme fixant les Orientations de la Politique Énergétique.
- (2007). Arrêté relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants.
- (2007). Décret relatif aux études de faisabilité des approvisionnements en énergie, aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants.
- (2009). Mise en oeuvre du Grenelle de l'environnement (1).
- (2010). Engagement national pour l'environnement.
- (2014). Projet de loi relatif à la transition énergétique pour la croissance verte.
- ADEME (2010). Bilan Carbone : Guide méthodologique. Rapport technique, ADEME.
- ADEME (2013). Chiffres Clés du Bâtiment. Rapport technique, ADEME.
- ADEME (2014). Les logiciels de calcul énergétique.
- ADEME (2015). Centre de ressources sur les bilans de gaz à effet de serre.
- ALESSI, F. et SOLLARIS, M. (2011). Measurement of pollutant emissions in two similar very low energy houses with cast concrete and timber frame. *In AICV Conference*, Bruxelles.
- AMRIZAL, N., CHEMISANA, D. et ROSELL, J. (2013). Hybrid photovoltaic-thermal solar collectors dynamic modeling. *Applied Energy*, 101:797–807.
- ARMSTRONG, S. et HURLEY, W. (2010). A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. *Applied Thermal Engineering*, 30(11-12):1488–1495.
- BADREDDINE, R. (2012). *Gestion Énergétique optimisée pour un bâtiment intelligent multi-sources multi-charges : différents principes de validations*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- BELHADJ, M., BENOUAZ, T., CHEKNANE, A. et BEKKOUCHE, S. M. A. (2010). Estimation de la puissance maximale produite par un générateur photovoltaïque. *Revue des Énergies Renouvelables*, 13(2):257–264.
- BELOIN-SAINT-PIERRE, D. (2012). *Vers une caractérisation spatio-temporelle pour l'analyse du cycle de vie*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

- BERGMAN, R. D., SALAZAR, J. et BOWE, S. (2012). Developing a dynamic life cycle greenhouse gas emission inventory for wood construction for two different end-of-life scenarios. *In International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction*, Nantes.
- BERGOUGNOUX, J. (2013). EDEN : Communiqué de presse.
- BLANC, I., BELOIN-SAINT-PIERRE, D., PAYET, J., JACQUIN, P., ADRA, N. et MAYER, D. (2008). Espace-PV : key sensitive parameters for environmental impacts of grid-connected PV systems with LCA. *In 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Valence.
- BLENGINI, G. A. et DI CARLO, T. (2010). The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy and Buildings*, 42(6):869–880.
- BOTIN, A., CADIN, D., COLLET, I., DUSSUD, F.-X., FRATACCI, L., LAUVERJAT, J., LOUATI, S., MARTIN, J.-P., RABAÏ, Y., REYNAUD, D., ROQUETTE, C. et WONG, F. (2014). Bilan énergétique de la France pour 2013. Rapport technique, Service de l'observation et des statistiques.
- BOUCKAERT, S. (2013). *Contribution des Smart Grids à la transition énergétique : évaluation dans des scénarios long terme*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- BOYER, B. et CLERET, C. (2014). Cap sur le futur "Bâtiment responsable". Rapport technique, Groupe RBR 2020 -2050.
- BROWN, S., ASAN, U. et RAEV, I. (1997). Les forêts et le changement climatique : les terres boisées comme puits de carbone. *Comptes rendus du XI Congrès forestier mondial*, pages 13–22.
- BRU, K. (2010). Projet ANR COFRAGE : Caractérisation du gisement des déchets de chantier du BTP à l'échelle du territoire français. Rapport technique, BRGM.
- BUCCIARELLI, L. L. (1979). Power loss in photovoltaic arrays due to mismatch in cell characteristics. *Solar Energy*, 23(4):277–288.
- CADIN, D. (2014). Enquête annuelle sur le marché du gaz naturel : résultats 2012. Rapport technique 508, Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie.
- CEN (2012a). EN 15804 : Sustainability for construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products. Rapport technique, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2012b). EN 15978 : Sustainability of construction works - Sustainability assessment of buildings - Calculation method. Rapport technique, European Committee for Standardization, Brussels.
- CENTRE D'ANALYSE STRATÉGIQUE (2011). L'évolution des prix du logement en France sur 25 ans.

- CHEN, I.-C., FUKUSHIMA, Y., KIKUCHI, Y. et HIRAO, M. (2012). A graphical representation for consequential life cycle assessment of future technologies—Part 2 : two case studies on choice of technologies and evaluation of technology improvements. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(3):270–276.
- CHERUBINI, F., STRØMMAN, A. H. et HERTWICH, E. (2011). Effects of boreal forest management practices on the climate impact of CO₂ emissions from bioenergy. *Ecological Modelling*, 223(1):59–66.
- CITEPA (2014). Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France - Format SECTEN. Rapport technique, Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique.
- CIULLA, G., LO BRANO, V. et MORECI, E. (2013). Forecasting the Cell Temperature of PV Modules with an Adaptive System. *International Journal of Photoenergy*, 2013:1–10.
- COLIN, A. et DERRIÈRE, N. (2005). La forêt française : un puits de carbone? Son rôle dans la limitation des changements climatiques. *Inventaire Forestier*, 7.
- COLLET, P., LARDON, L., STEYER, J.-P. et HÉLIAS, A. (2014). How to take time into account in the inventory step : a selective introduction based on sensitivity analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(2):320–330.
- COLLINGE, W. O., LANDIS, A. E., JONES, A. K., SCHAEFER, L. A. et BILEC, M. M. (2013). Dynamic life cycle assessment : framework and application to an institutional building. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(3):538–552.
- DAIGNAN, J.-M. (2013). Mise en place d'un outil pour la génération de la courbe de charge d'un quartier. Rapport technique, CSTB; Polytech Clermont-Ferrand, Sofia Antipolis.
- EeBGUIDE (2012). Operational Guidance for Life Cycle Assessment Studies of Energy Efficient Buildings Initiative. Rapport technique, EeBGuide.
- EFFINERGIE (2015). Label effinergie +.
- ERDF (2015). Compensation des pertes.
- EUROSTAT (2015). Statistiques de l'énergie.
- FFB (2014). Le bâtiments en chiffres 2013.
- FFB et ADEME (2013). Mieux gérer les déchets de chantier bâtiment.
- FINNVEDEN, G., HAUSCHILD, M. Z., EKVALL, T., GUINÉE, J., HEIJUNGS, R., HELLWEG, S., KOEHLER, A., PENNINGTON, D. et SUH, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1):1–21.
- FORSBERG, A. et von MALMBORG, F. B. (2002). Choice of heat and electricity mix for environmental assessment of the built environment. *In Sustainable Building 2002*, Rotterdam.

- FOUQUET, M., LEBERT, A., GRANNEC, F., BAZZANA, M., BOSDEVIGIE, B., BUHÉ, C., SOUYRI, B. et WOLOSZYN, M. (2013). Influence of the variation of energy time step in buildings life cycle assessment. *In Congrès Avnir*, Lille.
- FOUQUET, M., LEBERT, A., LASVAUX, S., PEUPORTIER, B., ROUX, C., GUIOT, T., BUHE, C. et SOUYRI, B. (2014). Illustration of methodological challenges in energy and environmental assessment of buildings. *In Sustainable Building Conference 2014*, Barcelone.
- FOUQUET, M., LEVASSEUR, A., MARGNI, M., LEBERT, A., LASVAUX, S., SOUYRI, B., BUHÉ, C. et WOLOSZYN, M. (2015). Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings : Application to biogenic carbon and global warming assessment. *Building and Environment*, 90:51–59.
- FRISCHKNECHT, R., BÜSSER, S. et KREWITT, W. (2009). Environmental assessment of future technologies : how to trim LCA to fit this goal? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(6):584–588.
- FRISCHKNECHT, R. et STUCKI, M. (2010). Scope-dependent modelling of electricity supply in life cycle assessments. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(8):806–816.
- GAY, C. et SCHETELAT, P. (2013). Low carbon district - Energy and behaviour modelling. *In ICT for sustainable places*, Nice.
- GÄBEL, K. et TILLMAN, A.-M. (2005). Simulating operational alternatives for future cement production. *Journal of Cleaner Production*, 13(13-14):1246–1257.
- GOFFART, J. (2013). *Impact de la variabilité des données météorologiques sur une maison basse consommation. Application des analyses de sensibilité pour les entrées temporelles.* Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- GREENHALG, S., DAVIET, F. et WENINGER, E. (2005). The Land Use, Land-Use Change, and Forestry Guidance for GHG Project Accounting. Rapport technique, Word Resources Institute.
- GUINÉE, J. (2001). Life Cycle Assessment : An Operational guide to ISO standards. Rapport technique, Ministry of Housing, Spatial and Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, Pays-Bas.
- GUITON, M. et BENETTO, E. (2013). Analyse de Cycle de Vie conséquentielle : Identification des conditions de mise en oeuvre et des bonnes pratiques. Rapport technique, SCORE LCA, Centre de Recherche Public Henri Tudor.
- HAAS, B. et CORRALES, P. (2014). Solution pour l'interopérabilité avec COMETH. *In IBPSA France*, Arras.
- HANS, J., NIBEL, S., FREYD, A.-C., CUNHA, A., DORAN, D., BARROW WILLIAMS, T., AHVEHNIEMI, H., SCHMINCKE, E., LENZ, K., SOTO VICARIO, T., HORST, S., PYKE, C., KUZIAMKO, J. et RIGGS, L. (2013). "Piloting the Common Metrics", a research project of the Sustainable Building Alliance. *In CIB World building congress*.

- HERFRAY, G. (2011). *Contribution à l'évaluation des impacts environnementaux des quartiers*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- HOXHA, E. (2015). *Amélioration de la fiabilité des évaluations environnementales des bâtiments*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est.
- HUET, M., JOUVENT, M. et DAUGER, A. (2013). La garantie de performance énergétique : Encadrement légal du risque de mise en jeu de garantie décennale et méthodologie pratique de la garantie de performance énergétique intrinsèque (GPEI). Rapport technique, Plan Bâtiment Durable.
- HUIJBREGTS, M. A. J. (1998). Application of uncertainty and variability in LCA. Part 1 : A General Framework for the Analysis of Uncertainty and Variability in Life Cycle Assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 3(5):273–280.
- HUMBERT, S., ROSSI, V., MARGNI, M., JOLLIET, O. et LOERINCIK, Y. (2009). Life cycle assessment of two baby food packaging alternatives : glass jars vs. plastic pots. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(2):95–106.
- HUNT, R. G. et FRANKLIN, W. E. (1996). LCA—How it came about. *The international journal of life cycle assessment*, 1(1):4–7.
- IGNACIO ZABALZA BRIBIÁN, ALFONSO ARANDA USÓN et SABINA SCARPELLINI (2009). Life cycle assessment in buildings : State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment*, 44(12):2510–2520.
- INSEE (2006). Enquête logement. Rapport technique, INSEE.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2008). *World energy outlook 2008*. International Energy Agency ; Turpin Distribution, Paris ; New Milford, Conn.
- ISO (2006a). ISO 14040 : Environmental management - Life Cycle Assessment : Principles and framework. Rapport technique, International Organization for Standardization (ISO), Genève.
- ISO (2006b). ISO 14044 : Environmental management - Life cycle assessment : Requirements and guidelines. Rapport technique, International Organization for Standardization (ISO), Genève.
- JAFFRIN, A., BENTOUNES, N., JOAN, A. et MAKHLOUF, S. (2003). Landfill Biogas for heating Greenhouses and providing Carbon Dioxide Supplement for Plant Growth. *Biosystems Engineering*, 86(1):113–123.
- JRC (2011a). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook*. European Commission - Joint Research Centre, Luxembourg.
- JRC (2011b). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context*. European Commission - Joint Research Centre, Luxembourg, publications office of the European Union édition.

- JUNGBLUTH, N., EMMENEGGER, M. F., DONES, R., BAUER, C., HECK, T., BURGER, B. et FRISCHKNECHT, R. (2004). Life Cycle Inventories of Energy Systems : Results for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries. Rapport technique, ecoinvent, Dübendorf.
- KELLENBERGER, D., ALTHAUS, H.-J., KÜNNIGER, T., LEHMANN, M., JUNGBLUTH, N. et THALMANN, P. (2007). Life Cycle Inventories of Building Products. Rapport technique 7, ecoinvent, Dübendorf.
- KHASREEN, M. M., BANFILL, P. F. G. et MENZIES, G. F. (2009). Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings : A Review. *Sustainability*, 1(3):674–701.
- KÖNIG, H. et DE CRISTOFARO, M. L. (2012). Benchmarks for life cycle costs and life cycle assessment of residential buildings. *Building Research & Information*, 40(5):558–580.
- KOHLER, N. (2012). Life cycle assesment of buildings. *In International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction*, Nantes.
- KOHLER, N. et LÜTZKENDORF, T. (2002). Integrated life-cycle analysis. *Building Research & Information*, 30(5):338–348.
- KOHLER, N. A. (1986). *Analyse énergétique de la construction de l'utilisation et de la démolition de bâtiments*. Thèse de doctorat, EPFL, Lausanne.
- KPMG (2013). Secteur du bâtiment : Etude et analyse - Regard d'Experts. Rapport technique, KPMG.
- LAMBERT, S., GROS, B., ANDRÉ, A., JANIN, M., Miche de MALLERAY, G., MASSÉ, T., EL ABED, S. et LOUBOUTIN, H. (2012). Photovoltaïque vers une filière durable? Les critères de compétitivité économiques, environnementaux et sociétaux. Rapport technique, pwc.
- LASVAUX, S. (2010). *Étude d'un modèle simplifié pour l'analyse de cycle de vie des bâtiments*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- LAUSTSEN, J. (2008). Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings. *International Energy Agency (IEA)*, pages 477–488.
- LE DÉAUT, J.-Y. et DÉNEUX, M. (2013). Les freins réglementaires à l'innovation en matières d'économies d'énergie dans le bâtiment. Rapport technique, L'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques.
- LEBERT, A., LASVAUX, S., GRANNEC, F., ACHIM, F., CHEVALIER, J. et HANS, J. (2013). A statistical analysis of the environmental performances of low-energy buildings. *In Congres Avnir*, Lille.
- LEHERPEUR, I. B. (2009). Pétrole 2008 : Eléments statistiques. Rapport technique, Comité Professionnel du pétrole, Rueil Malmaison.

- LEVASSEUR, A., LESAGE, P., MARGNI, M., DESCHÊNES, L. et SAMSON, R. (2010). Considering time in LCA : dynamic LCA and its application to global warming impact assessments. *Environmental science & technology*, 44(8):3169–3174.
- LEVASSEUR, A., LESAGE, P., MARGNI, M. et SAMSON, R. (2013). Biogenic Carbon and Temporary Storage Addressed with Dynamic Life Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1):117–128.
- MARIGNAC, Y., SALOMON, T., SIDLER, O., HAZEMANN, J., ATTALI, S., Laramée de TANNENBERG, V., POUTREL, S., DESSUS, B., DEVIN, B., LABROUSSE, M. et LAPONCHE, B. (2010). Du gâchis à l'intelligence - Le bon usage de l'électricité. (27).
- MARIS, C., LOUSTAU, D., CAVAINAC, S., CHANTRE, G. et CORNILLIER, C. (2010). Expertise sur l'avenir du massif forestier des Landes de Gascogne - Critère Carbone. Rapport technique, CRPA Aquitaine, INRA, FCBA.
- MARTIN, M. et BERDHAL, P. (1984). Characteristics of infrared sky radiation in the United States. *Solar Energy*, 33(3/4):321–336.
- MATLAB (2015). Boxplot.
- MEDDE (2004). Plan Climat 2004 : Face au changement climatique, agissons ensemble. Rapport technique, Ministère de l'écologie.
- MEDDE (2010). Dossier de presse : Présentation de la Réglementation Thermique "Grenelle Environnement 2012".
- MEDDE (2011). Réglementation Thermique 2012 : un saut énergétique pour les bâtiments neufs.
- MEDDE (2013). Politiques climat et efficacité énergétique - Synthèse des engagements et résultats de la France. Rapport technique, Ministère de l'écologie.
- MEIJER, F., ITARD, L. et SUNIKKA-BLANK, M. (2009). Comparing European residential building stocks : performance, renovation and policy opportunities. *Building Research & Information*, 37(5-6):533–551.
- MERHEB, R. (2013). *Fiabilité des outils de prévision du comportement des systèmes thermiques complexes*. Thèse de doctorat, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.
- MESSAGIE, M., MERTENS, J., OLIVEIRA, L., RANGARAJU, S., SANFELIX, J., COOSEMANS, T., VAN MIERLO, J. et MACHARIS, C. (2014). The hourly life cycle carbon footprint of electricity generation in Belgium, bringing a temporal resolution in life cycle assessment. *Applied Energy*, 134:469–476.
- MICALES, J. et SKOG, K. (1997). The Decomposition of Forest Products in Landfills. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 39(2-3):145–158.
- MINER, R. (2005). Calculation Tools for Estimating Greenhouse Gas Emissions from Wood Products Manufacturing Facilities.

- MLETR (2014). Dossier de presse : Réunion du Comité de pilotage "Objectif relance construction".
- MÉTÉO-FRANCE (2013). Bilan de l'année 2012.
- MÉTÉO-FRANCE (2015). Bilan de l'année 2014.
- PAGE, J., ROBINSON, D., MOREL, N. et SCARTEZZINI, J.-L. (2008). A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence. *Energy and Buildings*, 40(2):83–98.
- PEHNT, M. (2006). Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable Energy*, 31(1):55–71.
- PEUPOORTIER, B., KELLENBERGER, D., ANINK, D., MÖTZL, H., ANDERSON, J., VARES, S., CHEVALIER, J. et KÖNIG, H. (2004). Inter-comparison and benchmarking of LCA-based environmental assessment and design tools. *In Sustainable Building 2004*, Warsaw.
- PEUPOORTIER, B. et SOMMEREUX, I. B. (1990). Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings. *International Journal of Solar Energy*, 8(2):109–120.
- POMMER, K., PADE, C., DANSK TEKNOLOGISK INSTITUT et NORDIC INNOVATION CENTRE (2006). *Guidelines uptake of carbon dioxide in the life cycle inventory of concrete*. Nordic Innovation Centre], Oslo, Norway.
- PRENTICE, I., FARQUHAR, G., FASHAM, M., GOULDEN, M., HEIMANN, M., JARAMILLO, V., KHESHGI, H., LE QUÉRÉ, C., SCHOLES, R. et WALLACE, D. (2001). The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. *In The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 183–237. Cambridge university press édition.
- RAMASWAMY, V., BOUCHER, O., HAIGH, J., HAUGLUSTAINE, D., HAYWOOD, J., MYRHE, G., NAKAJIMA, T., SHI, G. et SOLOMON, S. (2001). Radiative Forcing of Climate Change. *In Climate Change 2001 : The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 349–416. Cambridge, UK and New York, USA, cambridge university press édition.
- RASMUSSEN, F., BIRGISDOTTIR, H. et BIRKVED, M. (2013). System and scenario choices in the life cycle assessment of a building—changing impacts of the environmental profile. *In Sustainable Building Conference 2013*, Graz.
- REAP, J., ROMAN, F., DUNCAN, S. et BRAS, B. (2008). A survey of unresolved problems in life cycle assessment : Part 2 : impact assessment and interpretation. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(5):374–388.
- REMUND, J., MÜLLER, S., KUNZ, S., HUGUENIN-LANDL, B., STUDER, C., KLAUSER, D. et SCHILTER, C. (2014). *Meteonorm Handbook part II : Theory*. Rapport technique 7.1, METEOTEST, Bern, Switzerland.

- RIVA, A., D'ANGELOSANTE, S. et TREBESCHI, C. (2006). Natural gas and the environmental results of life cycle assessment. *Energy*, 31(1):138–148.
- RODLER, A., ROUX, J.-J., VIRGONE, J., KIM, E. J. et HUBERT, J.-L. (2013). Are 3d heat transfer formulations with short time step and sun patch evolution necessary for building simulation? *In Building simulation conference 2013*, Chambéry.
- RTE (2012). Pertes sur le Réseau Public de Transport.
- RTE (2014). Bilan électrique 2013. Rapport technique, RTE.
- RTE et ADEME (2007). Le contenu CO₂ du kWh électrique : Avantages comparés du contenu marginal et du contenu par usages sur la base historique.
- RTE, SYNDICAT ENERGIES RENOUVELABLES, ERDF et ADEEF (2014). Panorama de l'électricité renouvelable 2014. Rapport technique, RTE, ERDF, ADEEF, Syndicat des énergies renouvelables.
- SANTBERGEN, R. et van ZOLINGEN, R. (2008). The absorption factor of crystalline silicon PV cells : A numerical and experimental study. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(4):432–444.
- SARTORI, I., NAPOLITANO, A. et VOSS, K. (2012). Net zero energy buildings : A consistent definition framework. *Energy and Buildings*, 48:220–232.
- SCHMIDT, D. et ALA-JUUSELA, M. (2004). Low exergy systems for heating and cooling of buildings. *In Proceedings of the 21st conference on passive and low energy architecture, Eindhoven, The Netherlands*, pages 19–22.
- SCHMINCKE, E. (2011). The European standard EN 15804 for EPD in the construction sector and the application of the modularity principle. *In LCM 2011*, Berlin.
- SHAH, V. P. et RIES, R. J. (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):313–327.
- SHANTHIRABALAN, S. et ROCHARD, U. (2014). Inclusion of New Buildings in Residential Building Typologies : Step Towards NZEBs Exemplified for Different European Countries -France. Rapport technique D 2.4, Pouget Consultant.
- SIDLER, O. (2004). Campagne de mesures de l'éclairage dans 100 logements en France. Rapport technique, EDF, ADEME.
- SIDLER, O. (2009a). Connaissance et maîtrise des usages spécifiques de l'électricité dans le secteur résidentiel. Rapport technique, Enertech.
- SIDLER, O. (2009b). Energie primaire ou énergie finale ?
- SOES (2010). Le point sur services d'eau et d'assainissement : une inflexion des tendances ? Rapport technique, Service de l'observation et des statistiques.

- SOES (2013). Chiffres clés de l'énergie 2013. Rapport technique, Service de l'observation et des statistiques.
- SOIMAKALLIO, S., KIVILUOMA, J. et SAIKKU, L. (2011). The complexity and challenges of determining GHG (greenhouse gas) emissions from grid electricity consumption and conservation in LCA (life cycle assessment) – A methodological review. *Energy*, 36(12): 6705–6713.
- SPITZ, C., MORA, L., WURTZ, E. et JAY, A. (2012). Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house. *Energy and Buildings*, 55:459–470.
- TOMMASINI, O., BEAUGIRAUD, H., DE RODELLEC, J., DE SAUZA, D., MIT, P., RIDORET, D., ROBIN, J.-Y., SÉNÉCHAL, M., STERHHEIM, J.-P. et VILLEMUR, J. (2013). Analyse de l'évolution comparée des prix et des coûts dans le bâtiment - Préconisations en matière de simplifications réglementaires. Rapport technique, FFB, Paris.
- TURCONI, R., BOLDRIN, A. et ASTRUP, T. (2013). Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies : Overview, comparability and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28:555–565.
- van DAM, S., BAKKER, C. et BUTER, J. (2013). Do home energy management systems make sense? Assessing their overall lifecycle impact. *Energy Policy*, 63:398–407.
- van der VOET, E., LIFSET, R. J. et LUO, L. (2010). Life-cycle assessment of biofuels, convergence and divergence. *Biofuels*, 1(3):435–449.
- VILLOT, J. (2012). *Bâtiments et facteur 4, de l'émergence d'un objectif global à son application au niveau local : Analyse des problématiques de rénovation dans le secteur résidentiel à caractère social*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- VOGT, W. G. et AUGENSTEIN, D. (1997). Comparison of models for predicting landfill methane recovery. Final report. Rapport technique, SCS Engineers, Reston, VA (United States); Inst. for Environmental Management, Palo Alto, CA (United States).
- VOSS, K., SARTORI, I. et LOLLINI, R. (2012). Nearly-zero, Net zero and Plus Energy Buildings - How definitions & regulations affect the solutions. *REHVA Journal*, pages 23–27.
- WANG, X., PADGETT, J. M., POWELL, J. S. et BARLAZ, M. A. (2013). Decomposition of forest products buried in landfills. *Waste Management*, 33(11):2267–2276.
- YOUNG, R. (2014). Global approaches : A comparison of building energy codes in 15 Countries. In *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, Washington.

Annexe A

Annexes du chapitre 3

A.1 Analyse des courbes de charges du lot n°1

Pour rappel, les courbes de charges étudiées ici sont issues de mesures effectuées par Ener-tech entre 2002-2003 dans des bâtiments résidentiels. Ces logements n'utilisent pas d'électricité pour les usages suivants : chauffage, ECS, ventilation. La figure A.1 présente la consommation annuelle d'électricité (pour tous les usages) pour les 49 courbes de charges par mètre carré et par personne. Nous observons que le numéro 33 a une grande consommation annuelle par m², supérieure à tous les autres profils.

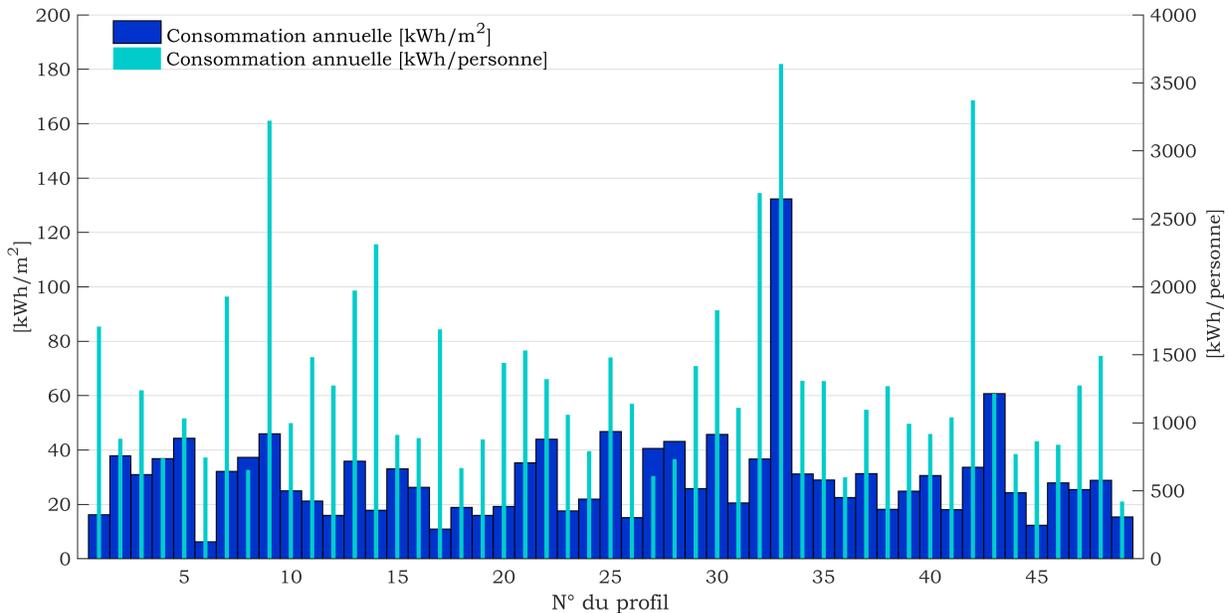


FIGURE A.1 – Consommation annuelle des 49 courbes de charges du lot n°1 par m² et par personne

La figure A.2 présente la puissance moyenne et le maximum de puissance de chacune des courbes de charges. Là encore, le profil 33 est le plus singulier : il a la plus grande puissance moyenne et le plus grand maximum de puissance.

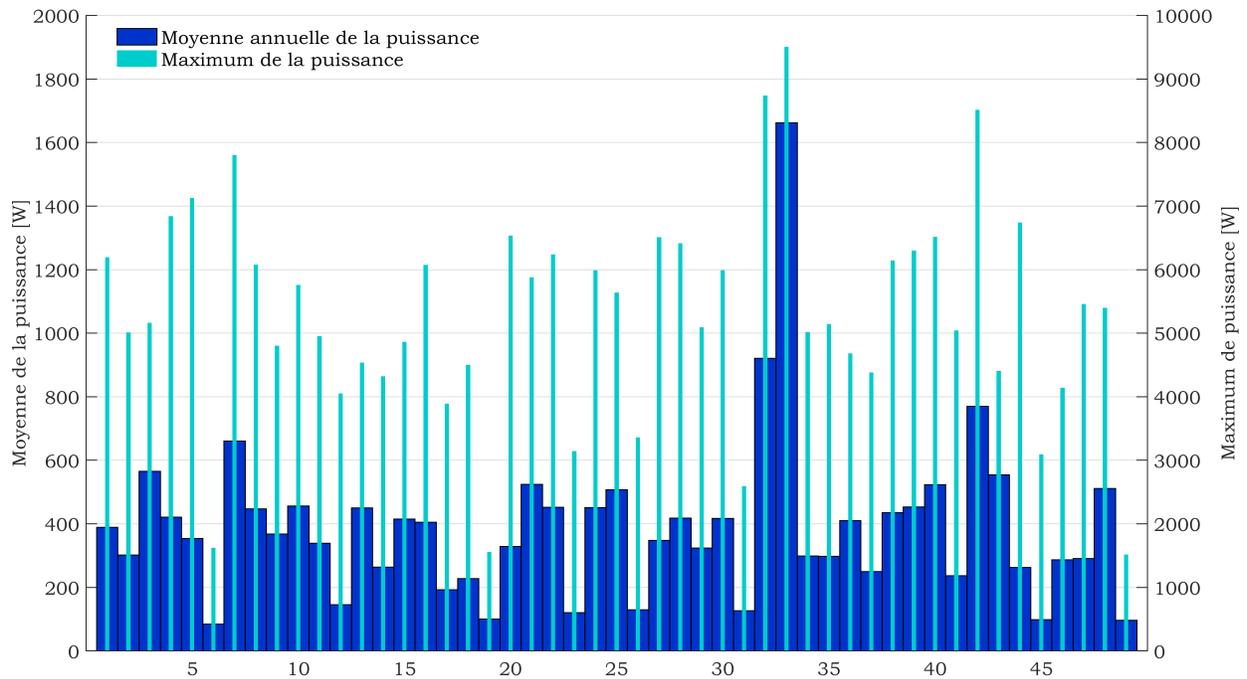


FIGURE A.2 – Moyenne annuelle et maximum de puissance sur 10 minutes pour les 49 courbes de charges du lot n°1

La figure A.3 présente l'indice de consommation journalier par rapport à la valeur moyenne annuelle pour chaque profil de consommation. Cette représentation permet d'évaluer quand les variations de consommation ont lieu au cours d'une journée. Ainsi, le profil 45 est singulier car il présente un pic de consommation à 7h du matin. Par ailleurs, le profil 32 est à contre-courant de la moyenne car sa consommation est faible pendant la journée et présente un pic de consommation entre 22h30 et 24h00.

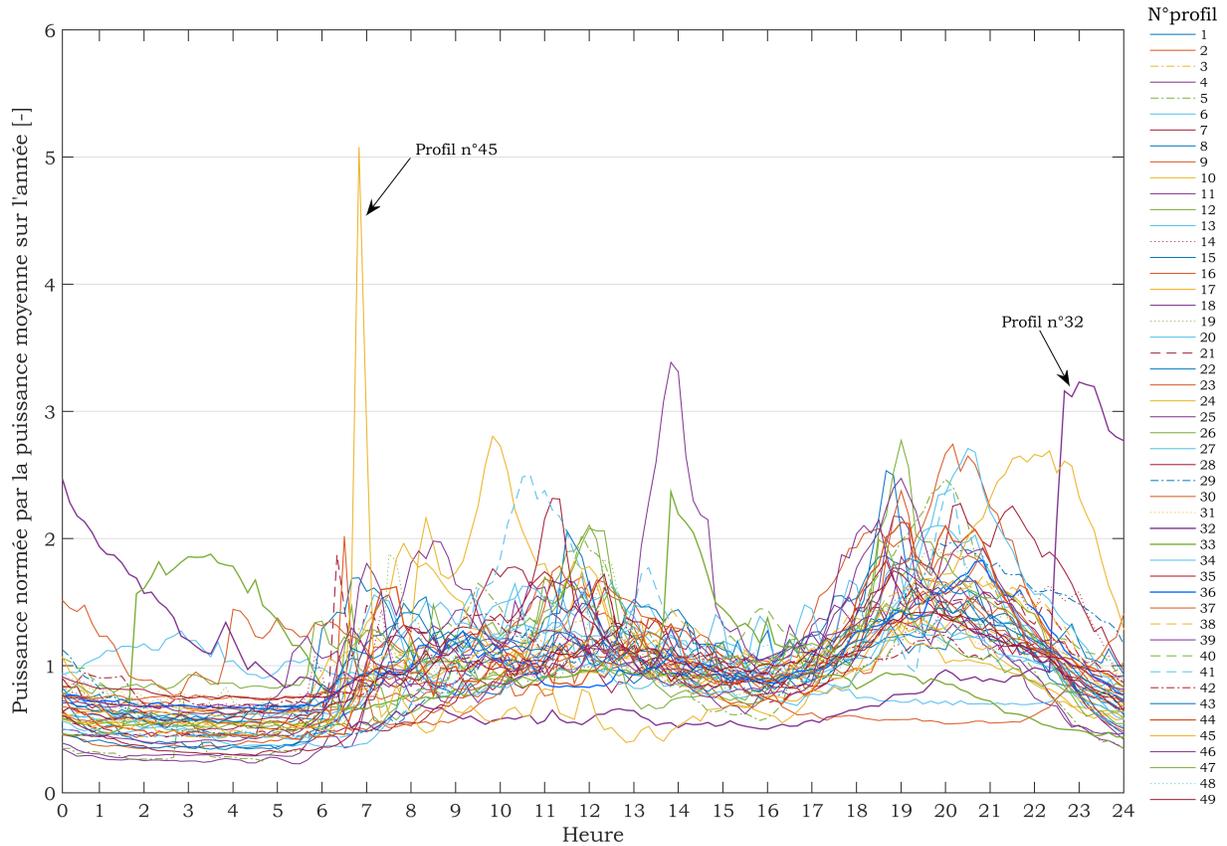


FIGURE A.3 – Profil journalier moyen sur l'année normé par la consommation moyenne sur l'année

La figure A.4 présente l'indice de consommation mensuelle par rapport à la valeur moyenne annuelle pour chaque profil de consommation. Cette représentation permet d'évaluer la saisonnalité de ces courbes de charges. Celle-ci est faible à modérée pour la plupart des courbes de charges. Certains profils, comme le 33 et le 44 présentent des pics de consommation sur certains mois d'hiver.

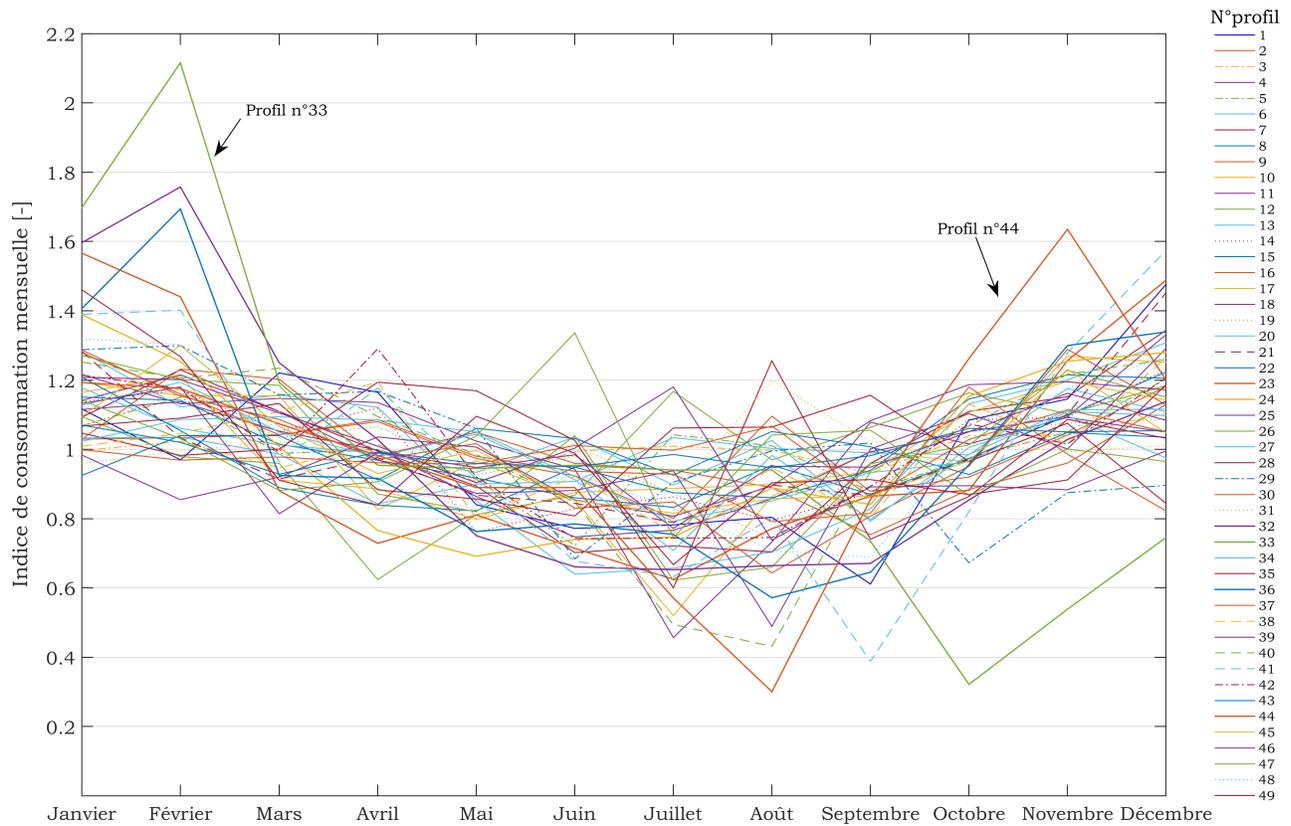


FIGURE A.4 – Indice de consommation mensuelle par rapport à la valeur moyenne annuelle

A.2 Description détaillée de la modélisation photovoltaïque

Les profils de production photovoltaïque se basent sur une modélisation simplifiée à une dimension (pas de discrétisation spatiale). Nous nous intéressons à la puissance en sortie de l'onduleur, il n'y a donc pas de détails sur la tension ou l'intensité produites.

Modélisation du module

Le module photovoltaïque est considéré comme étant du silicium cristallin avec une puissance crête standard W_c de 150 Wc par m² représentatif du marché actuel (RTE *et al.*, 2014). A chaque instant, comme présenté par (Belhadj *et al.*, 2010), la puissance P_{PV} en sortie de 1 m² de module est définie par :

$$P_{PV} = W_c \times n_G \times R \times Pertes \quad (\text{A.1})$$

n_G est la normalisation de l'irradiance et correspond donc au ratio entre l'ensoleillement total incident G (donnée d'entrée du modèle) et l'irradiance de référence pour les conditions standard de test (STC *Standard Test Conditions*) des modules G_{STC} , d'une valeur de 1000 W/m².

$Pertes$ représente les pertes électriques dues à la connectique, elles sont de l'ordre de 2 % (Bucciarelli, 1979)

R est le ratio de modification du rendement du module par rapport aux conditions STC, calculé de la manière suivante :

$$R = \max(0; 1 + C_{BL} \ln(\max(\epsilon; n_G)) \times (1 - \mu(T_{mod} - T_{STC}))) \quad (\text{A.2})$$

C_{BL} est le coefficient de baisse de rendement à basse lumière, il a une valeur de 0,07 pour du silicium mono-cristallin.

ϵ est un coefficient arbitraire empêchant une valeur nulle pour le calcul du logarithme népérien, nous l'avons fixé ici à 1.10^{-7} .

μ est le coefficient de température des modules et vaut $0,004^\circ\text{C}^{-1}$ (Belhadj *et al.*, 2010).

T_{STC} est la température de référence STC de 25°C .

T_{mod} est la température instantanée du module, on l'obtient en résolvant l'équation suivante ramenée à 1 m² de modules (Ciulla *et al.*, 2013) :

$$\frac{dT_{mod}}{dt} = (H_{tot} \times (T_a - T_{mod}) + H_{rad} \times (T_{ciel} - T_a) + Q_t) / M_s \quad (\text{A.3})$$

H_{tot} est le coefficient d'échange convectif et radiatif, somme du coefficient d'échange convectif pour les faces avant et arrière du module H_{conv} d'une valeur de 11 W/K (Armstrong et Hurley, 2010) et du coefficient d'échange radiatif H_{rad} d'une valeur de 4 W/K. H_{conv} est considéré constant, le vent n'est donc pas pris en compte. Pour H_{rad} , on ne considère pas de masque d'horizon.

M_s est l'inertie des modules d'une valeur semi-empirique de 10 000 J/K (Amrizal *et al.*, 2013).

Q_t est le flux solaire thermique absorbé par les modules, il correspond au flux solaire absorbé moins ce qui est transformé en électricité :

$$Q_t = G \times (\tau_\alpha - \eta_{STC}) \quad (\text{A.4})$$

τ_α est le coefficient d'absorption solaire, d'une valeur de 0,95 (Santbergen et van Zolingen, 2008).

η_{STC} est le rendement du module photovoltaïque en condition STC i.e. le rapport entre la puissance crête par m^2 P_c et l'irradiance de référence G_{STC} , soit 15%. Le rendement est donc approximé comme une constante aux conditions STC i.e. il n'y a pas de rétroaction entre le modèle thermique et le modèle électrique.

Enfin, la température du ciel T_{ciel} se déduit de la température ambiante T_a grâce à l'équation suivante (Martin et Berdhal, 1984) :

$$T_{ciel} = (T_a + 273,15) \times \epsilon_c^{0,25} - 273,15 \quad (\text{A.5})$$

où ϵ_c est l'émissivité du ciel et vaut 0,8.

Ainsi, les équations A.1 à A.5 permettent de déterminer la puissance P_{PV} en sortie du module.

Modélisation de l'onduleur

Pour l'onduleur, nous avons considéré que sa puissance nominale P_{Nom} était proportionnelle à la puissance crête des modules, le rapport entre ses deux grandeurs étant de 0,85. Par ailleurs, le rendement de l'onduleur dépend de sa charge : il ne démarre qu'à un seuil minimum de 5 % de charge et une saturation est activée si la puissance d'entrée est 30 % supérieure à la puissance nominale. La puissance maximale en sortie de l'onduleur est donc défini comme :

$$P_{out}^{Max} = (A + B \times Max + C/Max) \times Max \times W_c \quad (\text{A.6})$$

A , B et C sont les facteurs de forme de l'onduleur et ont pour valeurs respectives $9,91.10^{-1}$, $-2,86.10^{-2}$ et $4,09.10^{-3}$. Ces facteurs définissent un onduleur dont le rendement maximum sera de l'ordre de 97 %.

Max est le ratio entre la puissance maximale en sortie de l'onduleur et la puissance nominale de ce dernier et vaut donc 1,3.

Dans le cas où l'onduleur démarre ($P_{PV} \leq 0,05 \times P_{Nom}$) et où il n'est pas saturé, son rendement peut s'écrire :

$$\eta_{ond} = A + B \times \frac{P_{PV}}{P_{Nom}} + C \times \frac{P_{Nom}}{P_{PV}} \quad (\text{A.7})$$

Finalement, la puissance en sortie de l'onduleur s'écrit à chaque instant comme :

$$P_{out} = \min(P_{PV} \times \eta_{ond}; P_{out}^{Max}) \quad (\text{A.8})$$

A.3 Configurations des logements collectifs

A partir du lot de charge n°1 décrit dans la section A.1, nous assemblons les différentes courbes de charges pour obtenir 30 bâtiments de logements collectifs comme décrit dans le tableau A.1.

TABLE A.1 – Configuration des logements collectifs créés à partir du lot de courbes de charges n°1

Cas	Niveaux	Surface par niveaux [m ²]	Nombre de logements
LC 1	2	152	4
LC 2	2	145	4
LC 3	2	155	4
LC 4	2	145	4
LC 5	2	178	3
LC 6	2	108	3
LC 7	2	215	3
LC 8	3	151	6
LC 9	3	146	6
LC 10	3	155	6
LC 11	3	143	6
LC 12	3	177	5
LC 13	3	107	4
LC 14	4	151	8
LC 15	4	147	8
LC 16	4	145	8
LC 17	4	177	7
LC 18	5	150	10
LC 19	5	153	10
LC 20	5	152	10
LC 21	5	154	10
LC 22	6	146	12
LC 23	6	148	12
LC 24	6	148	12
LC 25	6	155	12
LC 26	6	155	12
LC 27	7	146	14
LC 28	7	148	14
LC 29	7	148	14
LC 30	7	156	14

Annexe B

Annexes du chapitre 4

B.1 Données environnementales des sources de gaz

Les données environnementales que nous avons associé à chaque source de production pour la modélisation du mix gazier sont issues de la base de données ecoinvent v3.1 (allocation par défaut) et sont référencées dans le tableau B.1. Les données sont référencées telles que les inventaires de cycles de vie correspondant aux données environnementales le sont dans ecoinvent (et donc en anglais). FR signifie que la donnée est adaptée au contexte géographique français. De même, BE correspond à la Belgique, De à l'Allemagne, ES à l'Espagne, NL aux Pays-Bas, NO à la Norvège, RU à la Russie, DZ à l'Algérie, NG au Nigéria et ROW au reste du monde.

TABLE B.1 – Données ecoinvent associées à chaque source de gaz naturel

Source	Données
Production française	Natural gas, high pressure FR market for Alloc Def, S [m3]
Utilisation des stocks	Natural gas, high pressure FR market for Alloc Def, S [m3]
Import Belgique	Natural gas, high pressure BE market for Alloc Def, S [m3]
Import Allemagne	Natural gas, high pressure DE market for Alloc Def, S [m3]
Import Espagne	Natural gas, high pressure ES market for Alloc Def, S [m3]
Import Pays-Bas	Natural gas, high pressure FR import from NL Alloc Def, S [m3]
Import Norvège	Natural gas, high pressure FR import from NO [m3]
Import Russie	Natural gas, high pressure FR import from RU Alloc Def, S [m3]
Import Algérie	Natural gas, high pressure FR import from DZ Alloc Def, S [m3]
Import Égypte	Natural gas, high pressure RoW market for Alloc Def, S [m3]
Import Nigéria	Natural gas, high pressure NG petroleum and gas production, on-shore Alloc Def, S [m3]
Import Trinidad et Tobago	Natural gas, high pressure RoW market for Alloc Def, S [m3]
Import Qatar	Natural gas, high pressure RoW market for Alloc Def, S [m3]
Import non spécifié	Natural gas, high pressure RoW market for Alloc Def, S [m3]

La figure B.1 présente les différences d'impacts entre ces différentes sources de gaz. En effet, ces sources diffèrent par :

- leurs compositions chimiques des gaz produits (parts de méthane, de propane, etc.);
- le type de production : onshore ou offshore;
- les pertes lors de la production et du transport;
- les parts d'importation différentes pour les pays concernés.

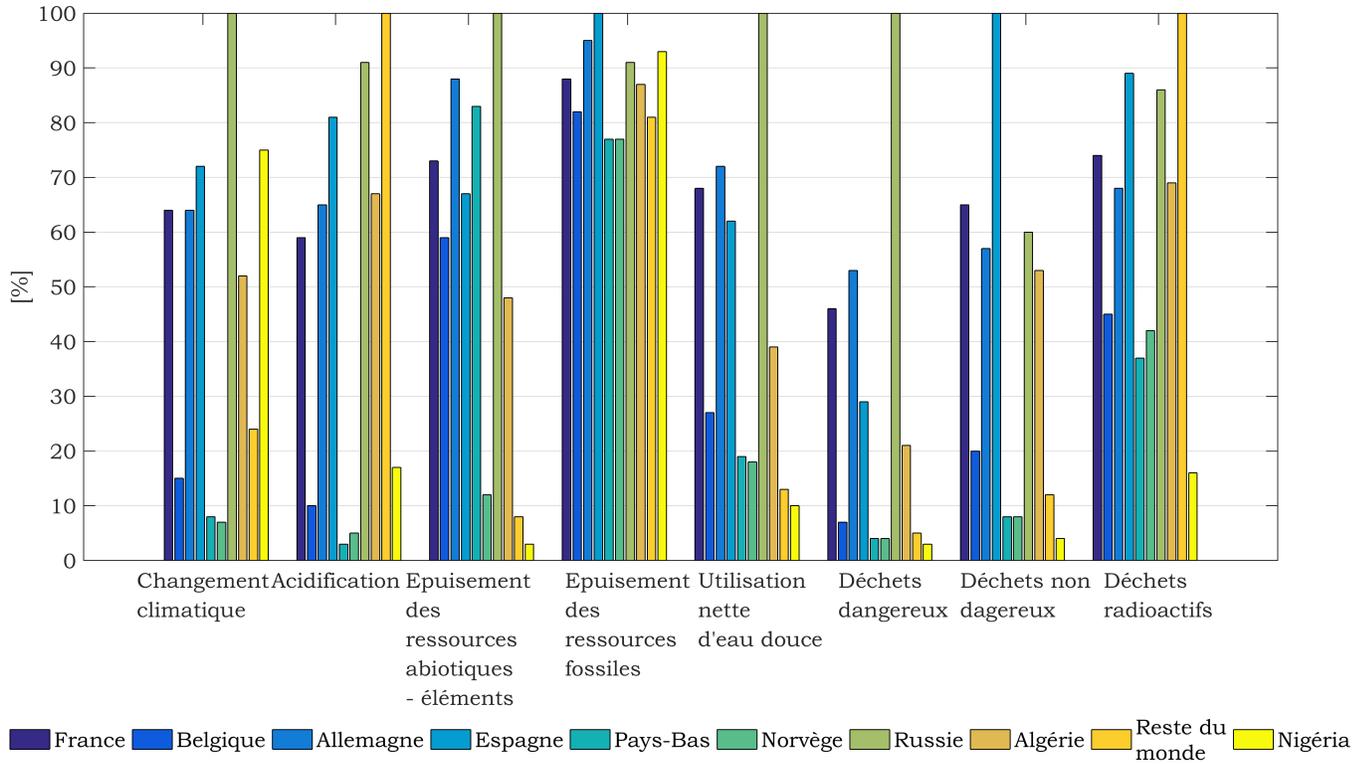


FIGURE B.1 – Différences d'impacts pour les différentes sources de gaz utilisées dans notre modélisation du mix gazier

Ainsi, la figure B.2 illustre le détail de l'impact sur le changement climatique pour quatre pays exportateurs : l'Algérie, les Pays-Bas, la Norvège et la Russie. Nous observons par exemple que le contributeur majoritaire de l'import de gaz de Russie sont les infrastructures de transport. En effet, c'est le pays le plus éloigné de la France.

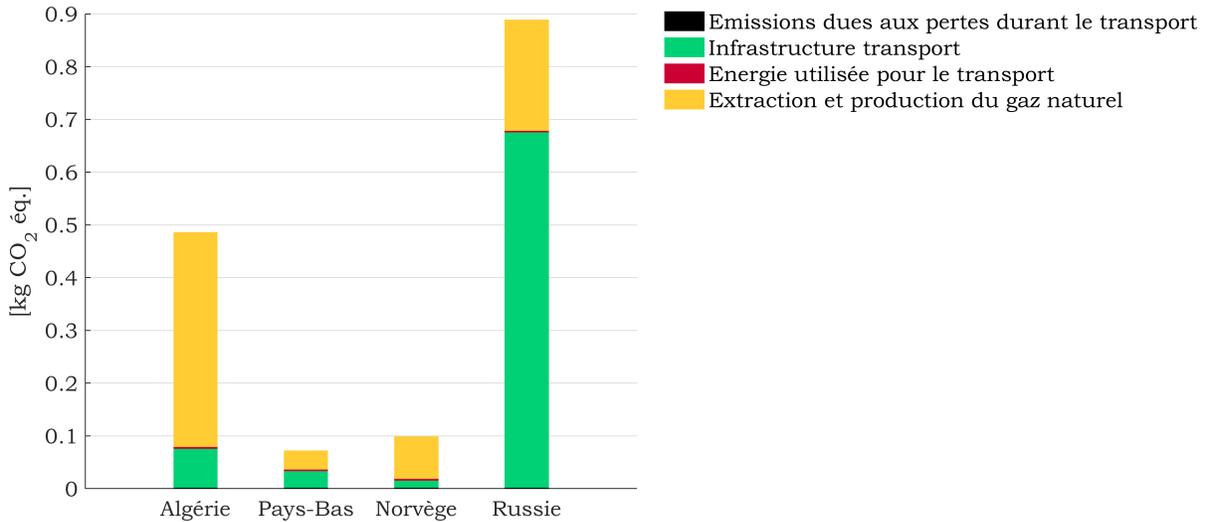


FIGURE B.2 – Impacts sur le changement climatique de l'import en France de gaz naturel provenant d'Algérie, des Pays-Bas, de la Norvège et de la Russie

B.2 Résultats complémentaires : application mix gazier mensuel

Les tableaux B.3 à B.6 présentent les indicateurs environnementaux complémentaires pour nos applications d'un mix gazier mensuel sur différents bâtiments.

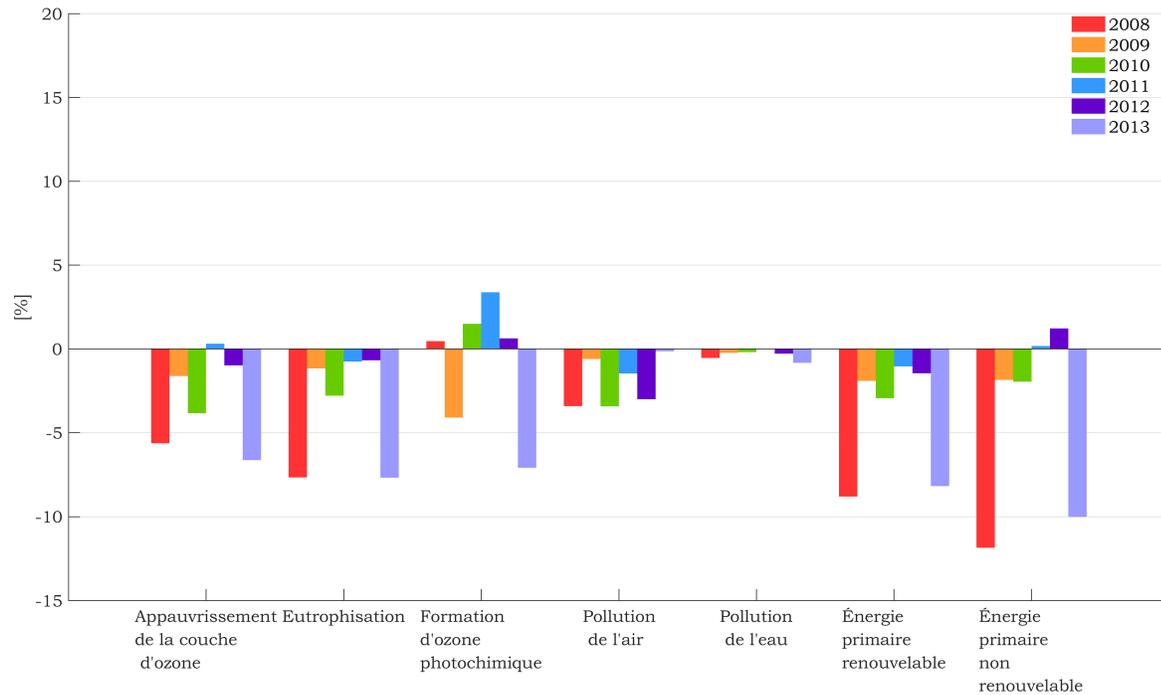


FIGURE B.3 – Différences induites pour la mise à disposition de gaz par l'utilisation d'un mix mensuel par rapport à un mix annuel pour un bâtiment de bureaux - Indicateurs complémentaires

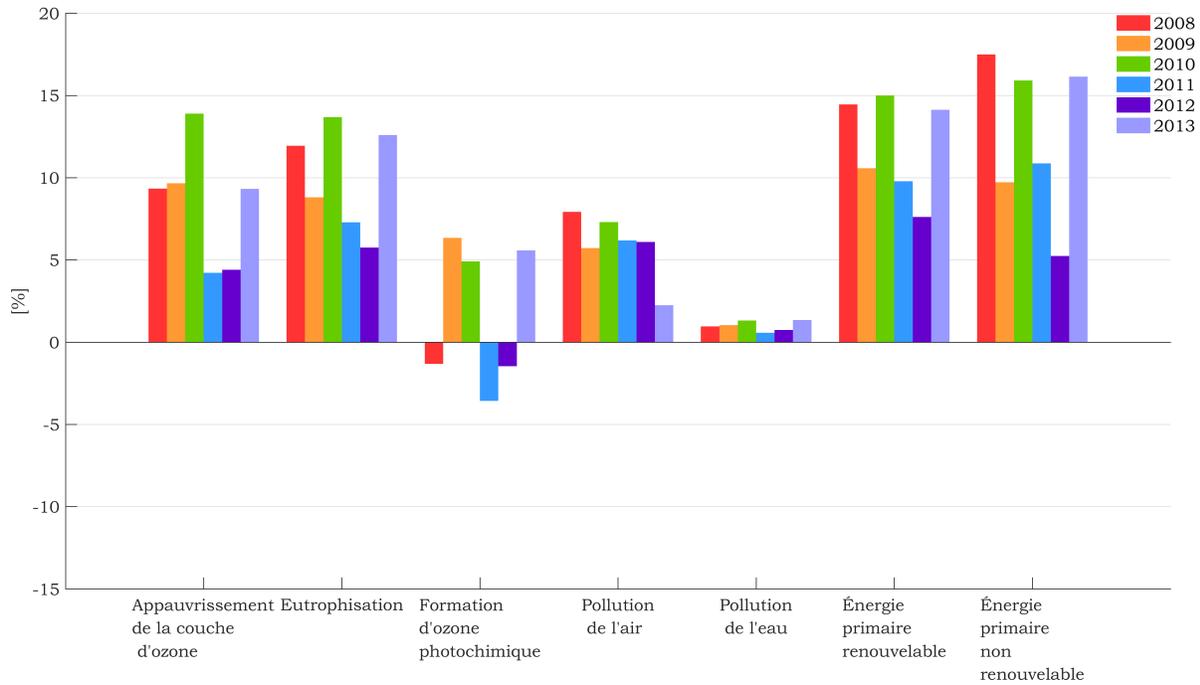


FIGURE B.4 – Différences induites pour la mise à disposition de gaz par l'utilisation d'un mix mensuel par rapport à un mix annuel pour un bâtiment commercial - Indicateurs complémentaires

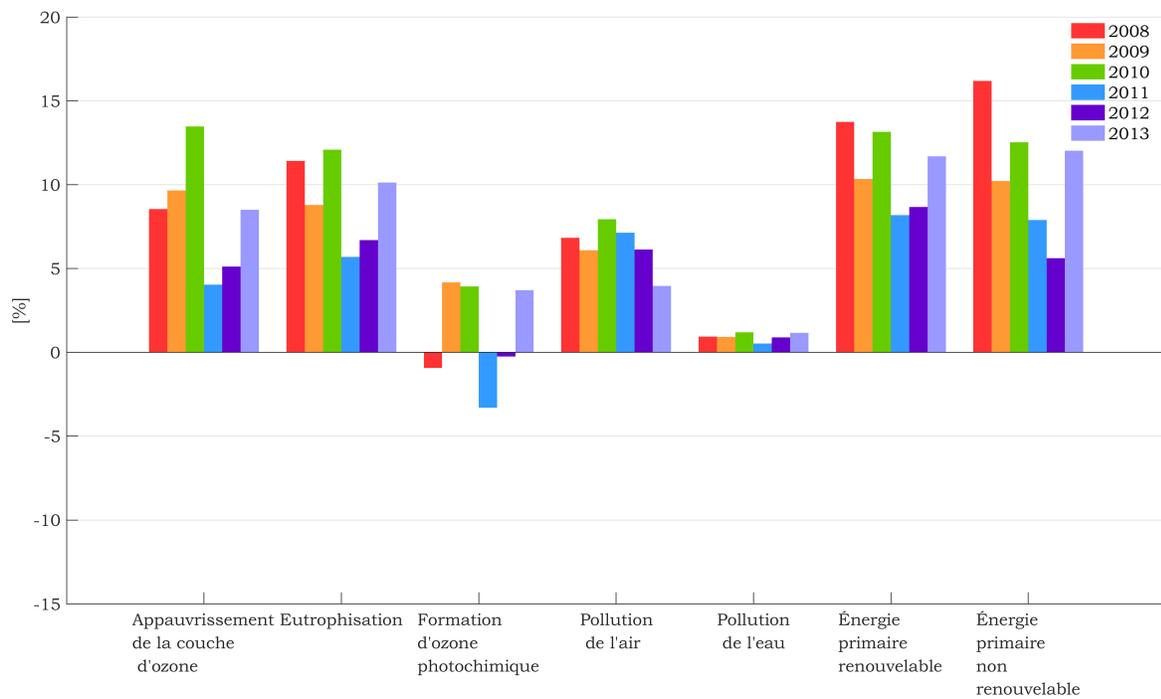


FIGURE B.5 – Différences induites pour la mise à disposition de gaz par l'utilisation d'un mix mensuel par rapport à un mix annuel pour un bâtiment de logements collectif - Indicateurs complémentaires

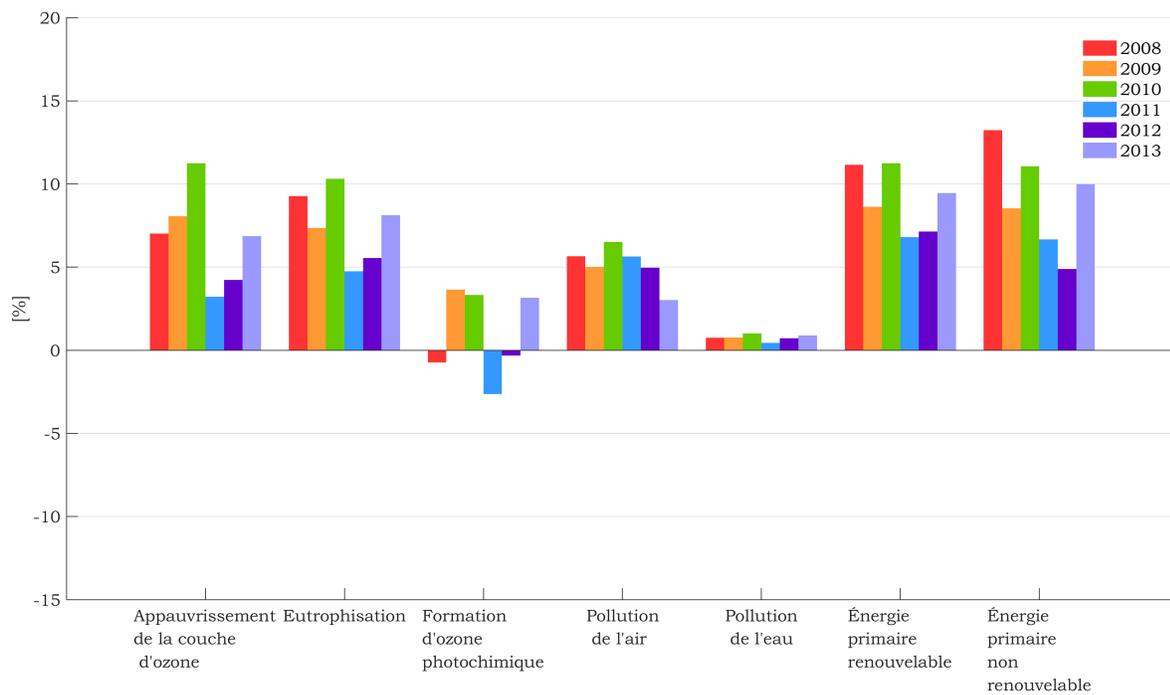


FIGURE B.6 – Différences induites pour la mise à disposition de gaz par l'utilisation d'un mix mensuel par rapport à un mix annuel pour une maison individuelle - Indicateurs complémentaires

B.3 Données environnementales des moyens de production électrique

Les données environnementales que nous avons associées à chaque moyen de production pour la modélisation du mix électrique sont issues de la base de données ecoinvent v3.1 (allocation par défaut) et sont référencées dans le tableau B.2. Les données sont référencées telles les inventaires de cycles de vie correspondant aux données environnementales le sont dans ecoinvent (et donc en anglais). FR signifie que la donnée est adaptée au contexte géographique français. De même, CH correspond à la Suisse, ROW au reste du monde et UCTE (*Union for the Coordination of Transmission of Electricity*) à l'Europe continentale et centrale. Quand une répartition doit être effectuée entre les moyens de production d'une même filière, les données proviennent de la base ecoinvent.

TABLE B.2: Données ecoinvent associées à chaque filière de production électrique

Filière de production	Données	Répartition
Charbon	Electricity, high voltage FR	electricity production, hard coal
Fioul - TAC ¹	Electricity, high voltage FR	electricity production, oil
Fioul - Cogénération	Electricity, high voltage CH	heat and power co-generation, diesel, 200kW electrical, SCR-NOx reduction
Fioul - Autres	Electricity, high voltage FR	electricity production, oil
Gaz - TAC	Electricity, high voltage FR	electricity production, natural gas, at conventional power plant
Gaz - Cogénération	Electricity, high voltage CH	heat and power co-generation, natural gas, 1MW electrical, lean burn » (adaptée au contexte français)
Gaz - CCG ²	Electricity, high voltage RoW	electricity production, natural gas, combined cycle power plant » (adaptée au contexte français)
Gaz - Autres	Electricity, high voltage FR	electricity production, natural gas, at conventional power plant
Hydraulique - Turbinage	Electricity, high voltage FR	electricity production, hydro, pumped storage
Hydraulique - Lac	Electricity, high voltage FR	electricity production, hydro, reservoir, alpine region
Hydraulique - Fil de l'eau	Electricity, high voltage FR	electricity production, hydro, run-of-river

1. Turbine A Combustion
2. Cycle Combiné à Gaz

Données ecoinvent associées à chaque filière de production électrique

Filière de production	Données	Répartition
EnR thermiques - Déchets	Electricity, high voltage FR treatment of municipal solid waste, incineration	
EnR thermiques - Biomasse	Electricity, high voltage FR heat and power co-generation, wood chips, 6400kW thermal, with extensive emission control	
EnR thermiques - Biogaz	Electricity, high voltage FR heat and power co-generation, biogas, gas engine	
Nucléaire	Electricity, high voltage FR electricity production, nuclear, pressure water reactor	
Solaire	Electricity, low voltage FR electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted	50%
	Electricity, low voltage FR electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted	40%
	Electricity, low voltage FR electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si	10%
Eolien	Electricity, high voltage FR electricity production, wind, <1MW turbine, onshore	8%
	Electricity, high voltage FR electricity production, wind, >3MW turbine, onshore	2%
	Electricity, high voltage FR electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore	90%
Import	Electricity, high voltage UCTE production mix	

B.4 Analyse des courbes de charges du lot n°3

Le tableau B.3 présente les équipements installés dans 18 bâtiments dont nous étudions les courbes de charges.

TABLE B.3: Description des équipements des 18 bâtiments du lot de courbes de charge n°3

Cas	Équipements
1	Chauffage : Chaudière granulés VMC ³ double flux ECS : 2 ballons électriques
2	Chauffage : Chauffage urbain VMC double flux ECS : 3 ballons électriques
3	Chauffage : Chaudière gaz condensation VMC simple flux sur puit canadien ECS : cumulus électriques
4	Chauffage : PAC ⁴ sur nappe CTA ⁵ double flux à roue
5	Chauffage : PAC à géothermie horizontale CTA double flux à roue Groupe froid sur air extérieur pour les salles de formation
6	Chauffage : 2 PAC sur nappe 2 CTA double flux échangeur à plaques Petits ballons ECS électriques ponctuels
7	Chauffage : réseau de chaleur CTA double flux échangeur à roue Ballons ECS électriques
8	Chauffage : chaudière bois granulés avec appoint gaz CTA double flux échangeur + PAC ECS : PAC sur eaux grises
9	Chauffage : chaudière gaz à condensation à brûleur modulant 3 CTA double flux échangeur à roue + 1 VMC simple flux Groupe froid pour la salle de conférence Ballons ECS électriques
10	Chauffage : VMC double flux thermodynamique avec appoint électrique ECS solaires avec appoint électrique
11	Chauffage : VMC double flux thermodynamique avec appoint électrique ECS solaires avec appoint électrique

3. Ventilation Mécanique Contrôlée

4. Pompe à Chaleur

5. Centrale de Traitement d'Air

Description des équipements des 18 bâtiments du lot de
courbes de charge n°3

Cas	Équipements
12	Chauffage : VMC double flux thermodynamique avec appoint électrique ECS solaires avec appoint électrique
13	Chauffage : VMC double flux thermodynamique avec appoint électrique ECS solaires avec appoint électrique
14	Chauffage : VMC double flux thermodynamique avec appoint électrique ECS solaires avec appoint électrique
15	Chauffage : VMC double flux thermodynamique avec appoint électrique ECS solaires avec appoint électrique
16	Chauffage : VMC double flux thermodynamique avec appoint électrique ECS solaires avec appoint électrique
17	Chauffage : VMC double flux thermodynamique avec appoint électrique ECS solaires avec appoint électrique
18	Chauffage : VMC double flux thermodynamique avec appoint électrique ECS solaires avec appoint électrique

La figure B.7 présente la consommation annuelle électrique (tous usages) par mètre carré et par personne (quand elles sont disponibles) pour les 18 courbes de charges de notre troisième lot de courbes de charge. Le profil n°12, une maison individuelle, est celle qui présente la consommation annuelle par mètre carré la plus élevée.

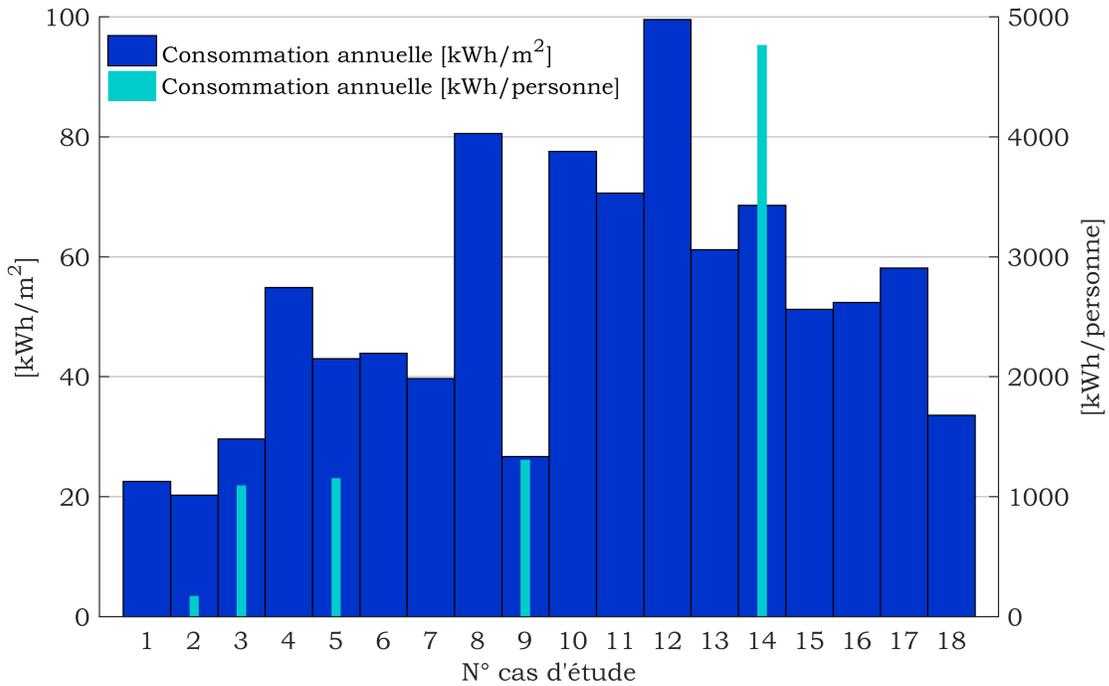


FIGURE B.7 – Consommation annuelle des 18 courbes de charges du lot n°3 par m² et par personne

La figure B.8 présente la puissance moyenne et le maximum de puissance de chacune des courbes de charges. La courbe de charge n°8 présente la moyenne annuelle de puissance la plus élevée ainsi que le maximum le plus élevé.

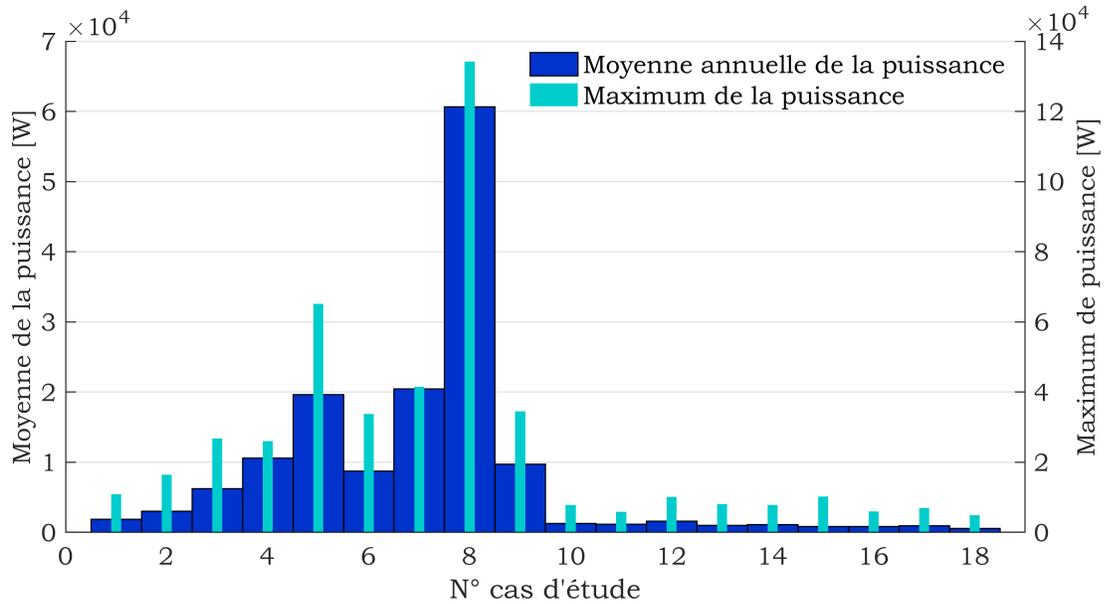


FIGURE B.8 – Moyenne annuelle et maximum de puissance sur 10 minutes pour les 18 courbes de charges du lot n°3

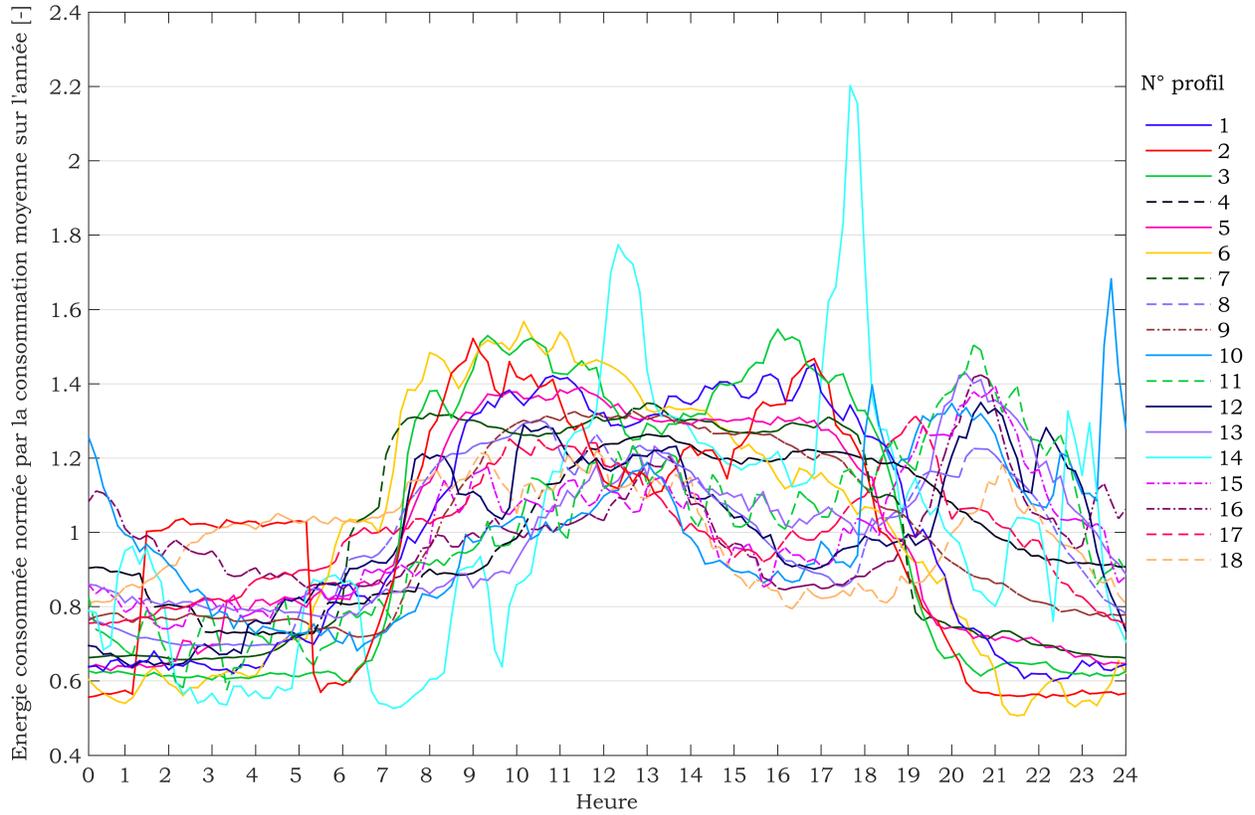


FIGURE B.9 – Profil journalier moyen sur l'année normé par la consommation moyenne sur l'année pour le lot de courbes de charge n°3

La figure B.9 présente l'indice de consommation journalier par rapport à la valeur moyenne annuelle pour chaque profil de consommation. Le profil 14 présente des pics de consommation entre 12h et 13h et à 18h. Le profil 2 présente un palier de consommation entre 1h et 6h du matin.

La figure B.10 présente l'indice de consommation mensuelle par rapport à la valeur moyenne annuelle pour chaque profil de consommation. Nous observons une forte saisonnalité des courbes de charge avec des consommations plus importantes en Janvier, Février, Novembre et Décembre. Cette saisonnalité est particulièrement importante pour les courbes de charges mesurées entre 2011 et 2012 car il a fait particulièrement froid en Février 2012.

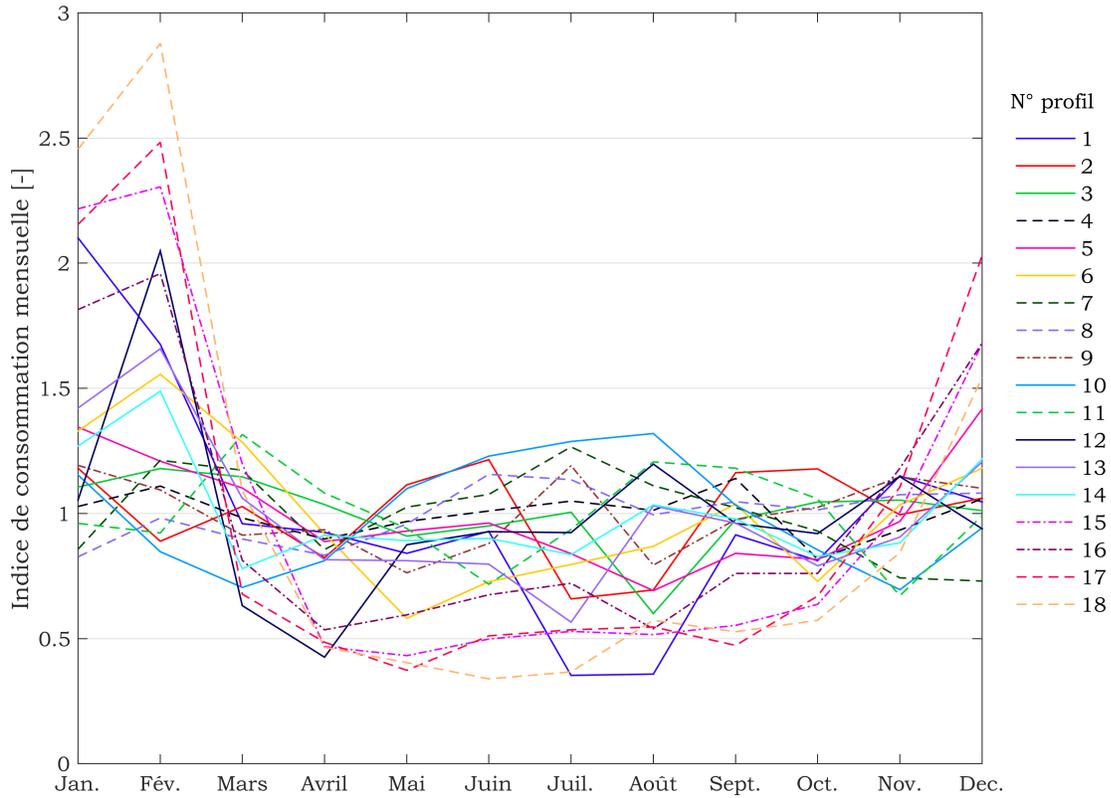


FIGURE B.10 – Indice de consommation mensuelle par rapport à la valeur moyenne annuelle pour le lot de courbes de charge n°3

B.5 Résultats complémentaires : Effacement

Le tableau B.4 présente les indicateurs environnementaux complémentaires pour les deux configurations de bâtiments étudiées pour les tests des modélisations temporelles du mix électriques et la prise en compte de l'effacement.

TABLE B.4 – Résultats sur les autres indicateurs environnementaux pour les deux configurations du bâtiment et les différents calculs (mix annuel vs. mix semi-horaire)

Indicateurs environnementaux calculés sur une année type	RT 1988				RT 2012			
	Calcul annuel		Calcul semi-horaire		Calcul annuel		Calcul semi-horaire	
	Sans effacement	Avec effacement	Sans effacement	Avec effacement	Sans effacement	Avec effacement	Sans effacement	Avec effacement
Appauvrissement de la couche d'ozone (g CFC-11 éq)	1,40	1,39	1,41	1,41	0,34	0,34	0,34	0,34
Eutrophisation (kg PO ₄ ³⁻ éq)	2,07	2,07	2,30	2,29	0,50	0,50	0,57	0,57
Formation d'ozone photochimique (kg C ₂ H ₄ éq)	0,53	0,53	0,62	0,62	0,13	0,13	0,16	0,16
Pollution de l'air (m ³)	274446	273888	286133	285575	66493	66462	69952	69930
Pollution de l'eau (m ³)	89335	89153	100374	100087	21644	21634	24958	24934
Énergie primaire non renouvelable (MJ)	178777	178414	180609	180361	43314	43294	43792	43802

B.6 Résultats complémentaires : Bâtiments producteurs d'énergie

Les tableaux B.5 à B.9 présentent les indicateurs environnementaux complémentaires pour les différentes configurations de calculs pour nos cas d'étude sur les bâtiments producteurs d'énergie.

TABLE B.5 – Lot N°1 : Incertitudes moyennes induites par les différentes méthodes de calcul - Indicateurs complémentaires

Indicateurs environnementaux	Référence	Cas A	Cas B
Appauvrissement de la couche d'ozone	100 %	95 %	95 %
Eutrophisation	100 %	95 %	98 %
Formation d'ozone photochimique	100 %	95 %	93 %
Pollution de l'air	100 %	95 %	95 %
Pollution de l'eau	100 %	95 %	96 %
Énergie primaire non renouvelable	100 %	95 %	95 %
Énergie primaire renouvelable	100 %	95 %	98 %

TABLE B.6 – Lot N°2 : Incertitudes moyennes induites par les différentes méthodes de calcul - Indicateurs complémentaires

Indicateurs environnementaux	Référence	Cas A	Cas B
Appauvrissement de la couche d'ozone	100 %	93 %	93 %
Eutrophisation	100 %	92 %	96 %
Formation d'ozone photochimique	100 %	93 %	91 %
Pollution de l'air	100 %	93 %	93 %
Pollution de l'eau	100 %	93 %	94 %
Énergie primaire non renouvelable	100 %	93 %	93 %
Énergie primaire renouvelable	100 %	92 %	96 %

TABLE B.7 – Lot N°1 et mix électrique 2014 : Incertitudes moyennes induites par les différentes méthodes de calcul - Indicateurs complémentaires

Indicateurs environnementaux	Référence	Cas A	Cas B
Appauvrissement de la couche d'ozone	100 %	95 %	95 %
Eutrophisation	100 %	95 %	97 %
Formation d'ozone photochimique	100 %	95 %	93 %
Pollution de l'air	100 %	95 %	95 %
Pollution de l'eau	100 %	95 %	95 %
Énergie primaire non renouvelable	100 %	95 %	95 %
Énergie primaire renouvelable	100 %	95 %	98 %

TABLE B.8 – Comparaison mix électrique 2012 et 2014 : Incertitudes moyennes pour le lot N°1 - Indicateurs complémentaires

Indicateurs environnementaux	Cas A - 2012	Cas A - 2014
Appauvrissement de la couche d'ozone	100 %	100 %
Eutrophisation	100 %	120 %
Formation d'ozone photochimique	100 %	80 %
Pollution de l'air	100 %	95 %
Pollution de l'eau	100 %	91 %
Énergie primaire non renouvelable	100 %	99 %
Énergie primaire renouvelable	100 %	104 %

TABLE B.9 – Comparaison mix électrique 2012 et 2013 : Incertitudes moyennes pour le lot N°1 - Indicateurs complémentaires

Indicateurs environnementaux	Cas A - 2012	Cas A - 2013
Appauvrissement de la couche d'ozone	100 %	97 %
Eutrophisation	100 %	102 %
Formation d'ozone photochimique	100 %	99 %
Pollution de l'air	100 %	100 %
Pollution de l'eau	100 %	104 %
Énergie primaire non renouvelable	100 %	98 %
Énergie primaire renouvelable	100 %	100 %

B.7 Description détaillée des maisons INCAS

Le tableau B.10 présente les matériaux utilisés dans les différentes maisons INCAS ainsi que leur quantité et leur durée de vie. Un pourcentage de pertes de 5 % est pris en compte pour la modélisation de la construction.

TABLE B.10 – Masse volumique, quantité et durée de vie des matériaux modélisés dans chaque maison INCAS

Matériaux	Masse volumique [kg/m ³] ¹	Durée de vie [an]	Quantité [kg]		
			BB	DM	OB
Polystyrène extrudé	32	50/100	2270	1222	1959
Béton armé :					
Béton	1380-2380	100	139898	43850	34064
Armatures en acier	100	2886	34064	355	
Bloc béton	1222	100	-	98630	-
Mortier de ciment	-	100	-	29806	-
Aggloméré de bois (liant : ciment)	1400	50	-	-	8117
Laine de bois	44	50	-	-	5341
Aggloméré de bois (usage intérieur)	670	100	-	-	3892
Plaque de plâtre	830	50	5018	5018	5784
Bois de structure	600	100	-	-	7551
Contreplaqué	670	100	-	-	1439
Polyuréthane	33	50	-	-	224
Mousse résolique	40	50	-	-	58
Granulé isolant (perlite)	64	50	-	-	18
Fibre de cellulose	38 kg/m ²	50	-	-	923
Crépis	1,2 kg/m ²	100	278	278	278
Laine de verre	16,5	50	539	1507	114
Carrelage en céramique	1200	100	1135	1135	1135
Tuiles	11375	100	2210	2210	2210
Laine de verre	16,5	50	539	1507	114
Double vitrage	20,07 kg/m ²	30	320	320	320
Cadres en PVC	94,5 kg/m ²	30	723	723	723
Triple vitrage	30,12 kg/m ²	30	20	20	20
Cadres en PVC	94,5 kg/m ²	30	68	68	68
Portes en bois	27,6-38,8 kg/m ²	35	477	477	477

1. Sauf mention contraire

B.8 Résultats complémentaires : aspects prospectifs

Le tableau B.11 présente les résultats en valeur absolue pour le forçage radiatif cumulé [W.an.m⁻²] pour les différents scénarios prospectifs considérés dans notre étude d'ACV dynamique réalisée sur les maisons INCAS.

TABLE B.11 – Comparaison des résultats en valeur absolue pour le forçage radiatif cumulé [W.an.m⁻²] obtenus avec les scénarios prospectifs et l'ACV dynamique pour des horizons de temps de 100 et 500 ans

Scénarios	100 ans				500 ans			
	OB enfouissement	OB incinération	DM	BB	OB enfouissement	OB incinération	DM	BB
1 (Réf.)	$1,67 \times 10^{-8}$	$1,68 \times 10^{-8}$	$2,54 \times 10^{-8}$	$2,59 \times 10^{-8}$	$7,67 \times 10^{-8}$	$8,34 \times 10^{-8}$	$1,07 \times 10^{-7}$	$1,07 \times 10^{-7}$
2 (VO-N)	$7,27 \times 10^{-9}$	$7,62 \times 10^{-9}$	$1,53 \times 10^{-8}$	$1,61 \times 10^{-8}$	$2,37 \times 10^{-8}$	$3,23 \times 10^{-8}$	$5,18 \times 10^{-8}$	$5,18 \times 10^{-8}$
3 (PE-N)	$1,34 \times 10^{-8}$	$1,36 \times 10^{-8}$	$2,18 \times 10^{-8}$	$2,24 \times 10^{-8}$	$5,97 \times 10^{-8}$	$6,73 \times 10^{-8}$	$8,49 \times 10^{-8}$	$8,94 \times 10^{-8}$
4 (A-A)	$1,66 \times 10^{-8}$	$1,68 \times 10^{-8}$	$2,40 \times 10^{-8}$	$2,45 \times 10^{-8}$	$7,65 \times 10^{-8}$	$8,40 \times 10^{-8}$	$1,05 \times 10^{-7}$	$1,06 \times 10^{-7}$
5 (VO-A)	$7,09 \times 10^{-9}$	$7,56 \times 10^{-9}$	$1,39 \times 10^{-8}$	$1,47 \times 10^{-8}$	$2,22 \times 10^{-8}$	$3,20 \times 10^{-8}$	$4,83 \times 10^{-8}$	$5,01 \times 10^{-8}$
6 (PE-A)	$1,32 \times 10^{-8}$	$1,35 \times 10^{-8}$	$2,04 \times 10^{-8}$	$2,10 \times 10^{-8}$	$5,85 \times 10^{-8}$	$6,70 \times 10^{-8}$	$8,72 \times 10^{-8}$	$8,76 \times 10^{-8}$

Annexe C

Annexes du chapitre 5

C.1 Sensibilité des impacts environnementaux à la variabilité du mix électrique à l'échelle du contributeur énergie et à l'échelle du bâtiment

C.1.1 A l'échelle du contributeur énergie

Les figures C.1 à C.6 présentent la sensibilité des résultats d'ACV du contributeur énergie sur l'échantillon HQE Performance par rapport à la variabilité temporelle du mix électrique pour les indicateurs suivants : l'acidification, l'énergie non renouvelable, l'utilisation nette d'eau douce, les déchets dangereux, non dangereux et radioactifs.

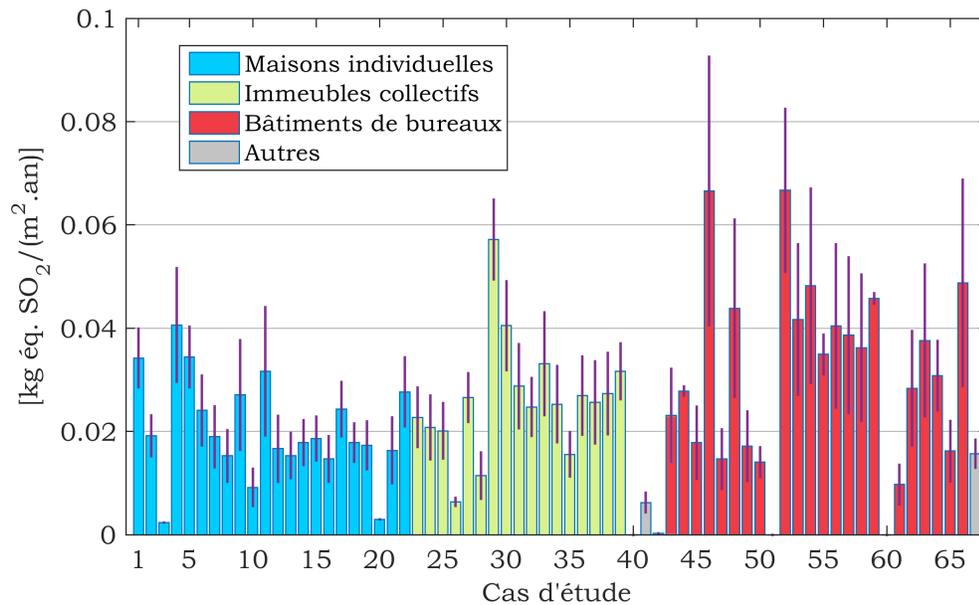


FIGURE C.1 – Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du contributeur énergie pour l'acidification

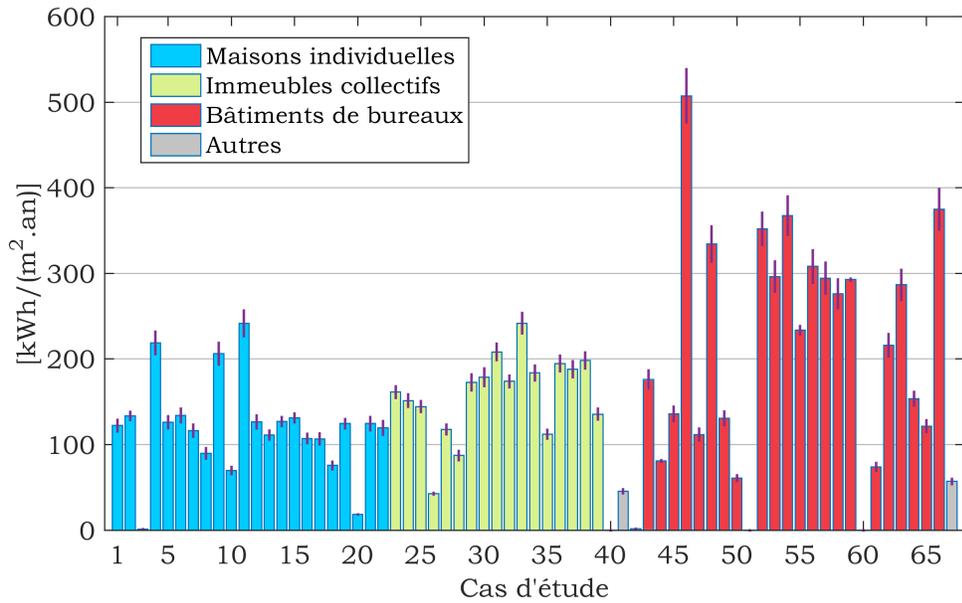


FIGURE C.2 – Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du contributeur énergie pour l'énergie non renouvelable

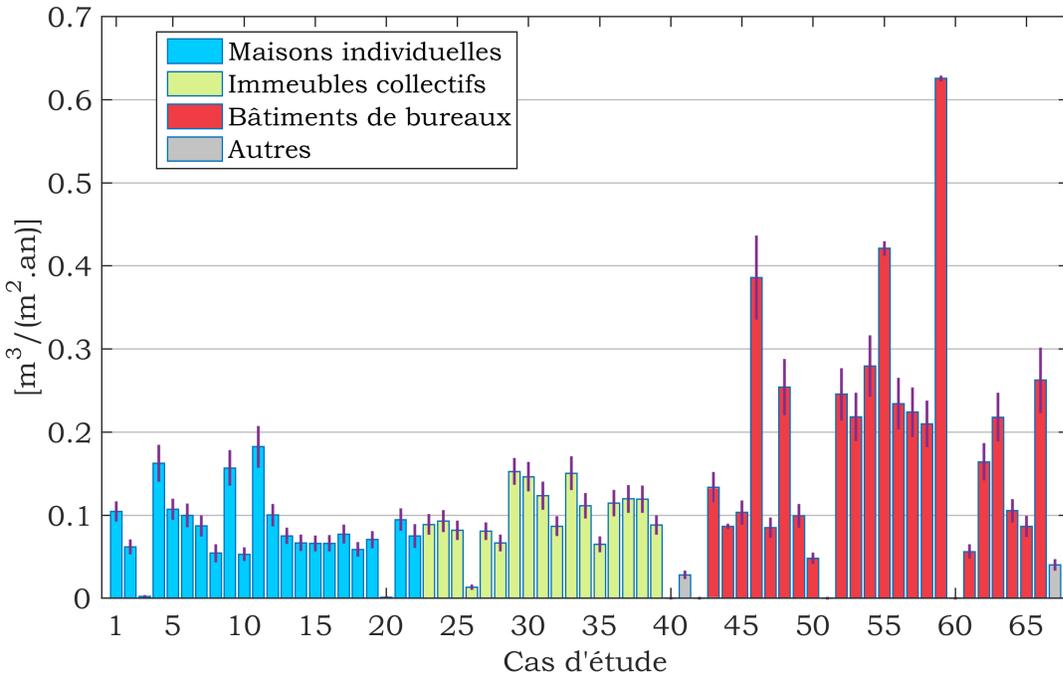


FIGURE C.3 – Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du contributeur énergie pour l'utilisation nette d'eau douce

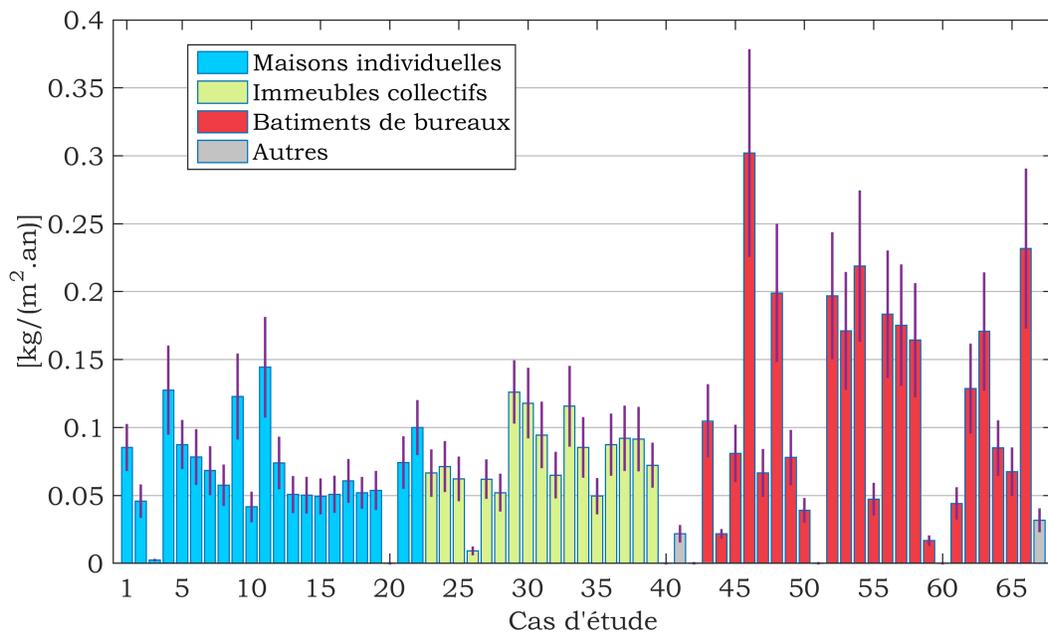


FIGURE C.4 – Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l’échelle du contributeur énergie pour les déchets dangereux

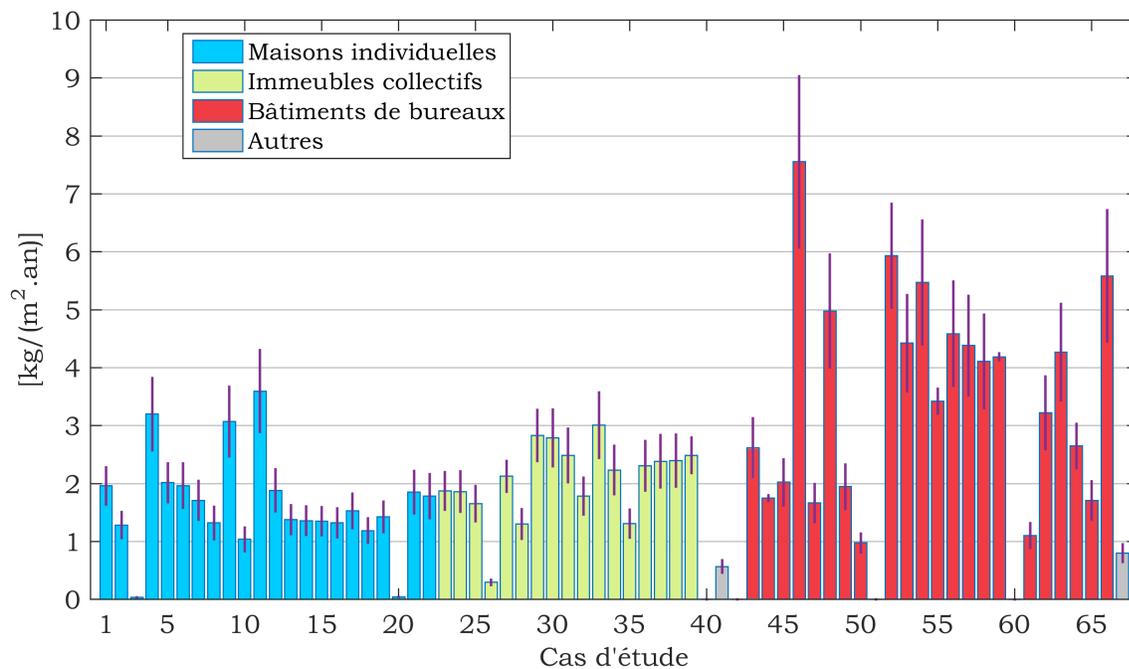


FIGURE C.5 – Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l’échelle du contributeur énergie pour les déchets non dangereux

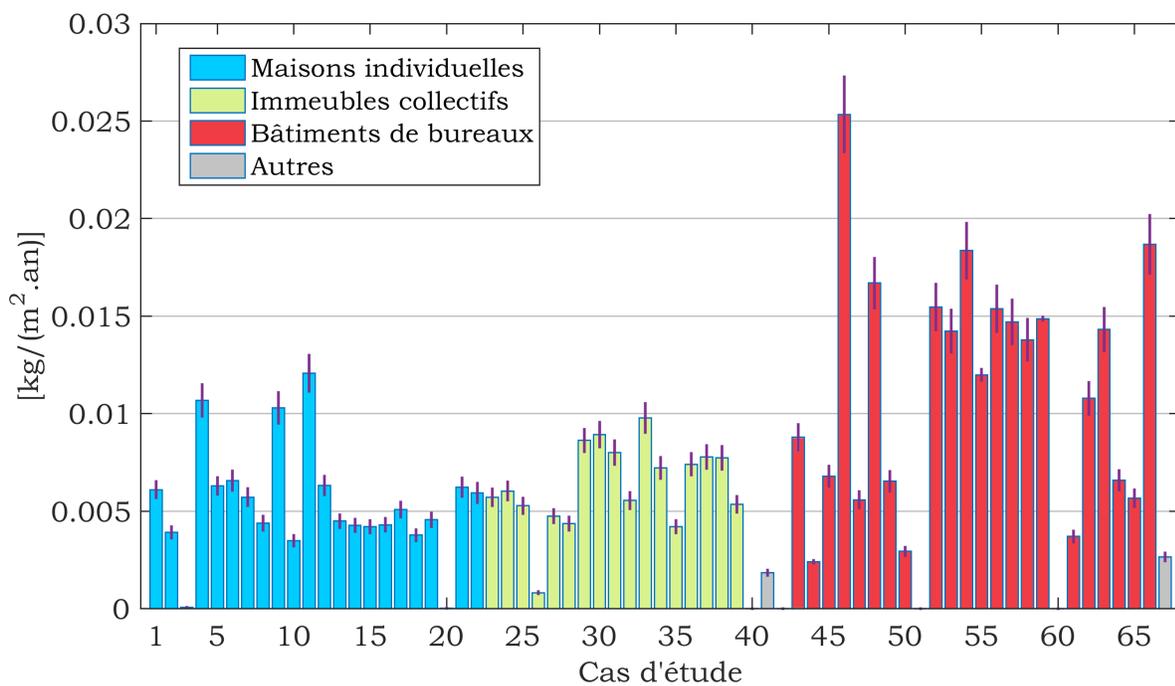


FIGURE C.6 – Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du contributeur énergie pour les déchets radioactifs

C.1.2 A l'échelle du bâtiment

Les figures C.7 à C.12 présentent la sensibilité des résultats d'ACV de chaque bâtiment de l'échantillon HQE Performance par rapport à la variabilité temporelle du mix électrique pour les indicateurs suivants : l'acidification, l'énergie non renouvelable, l'utilisation nette d'eau douce, les déchets dangereux, non dangereux et radioactifs.

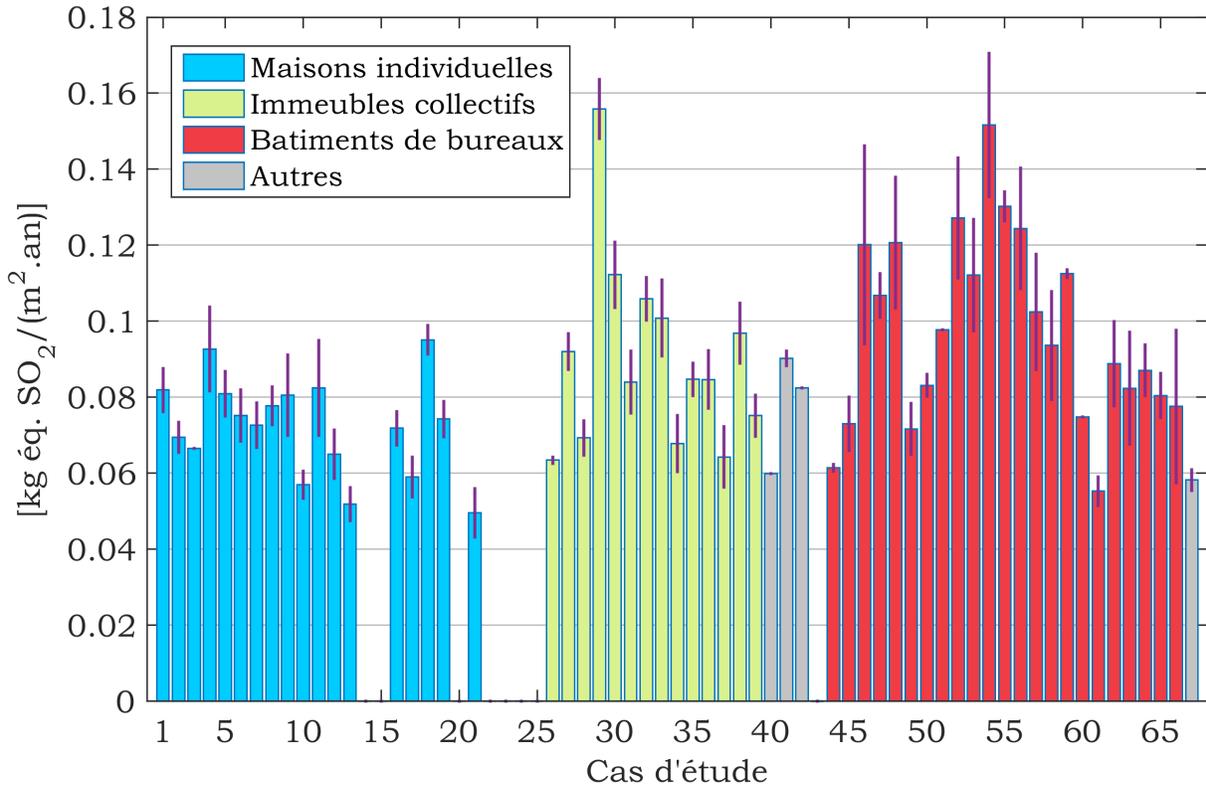


FIGURE C.7 – Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du bâtiment pour l'acidification

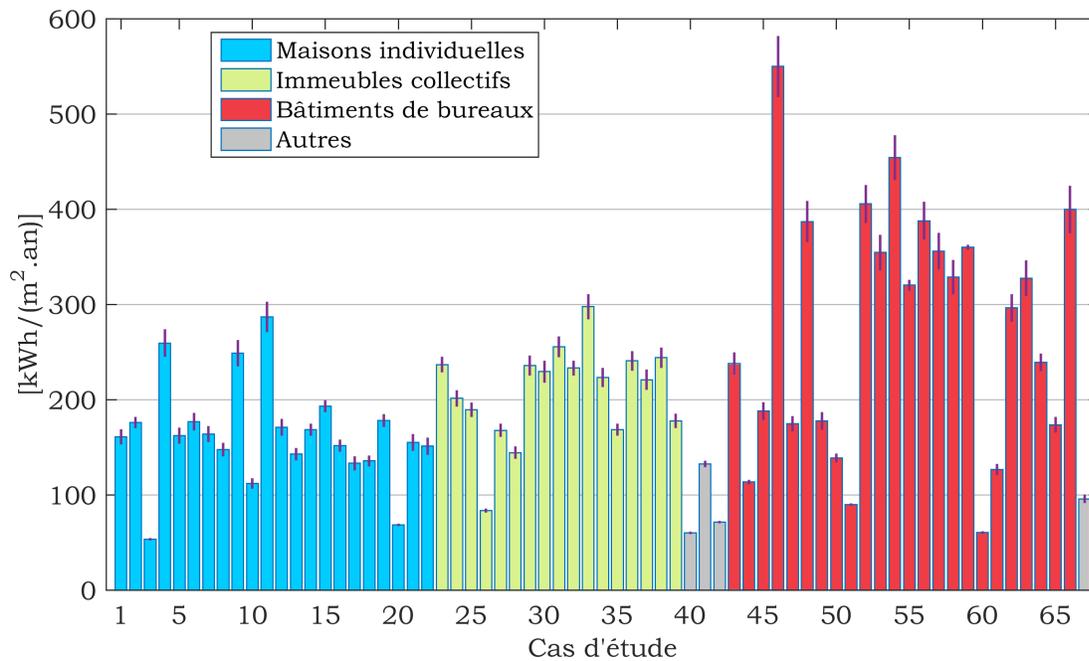


FIGURE C.8 – Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du bâtiment pour l'énergie non renouvelable

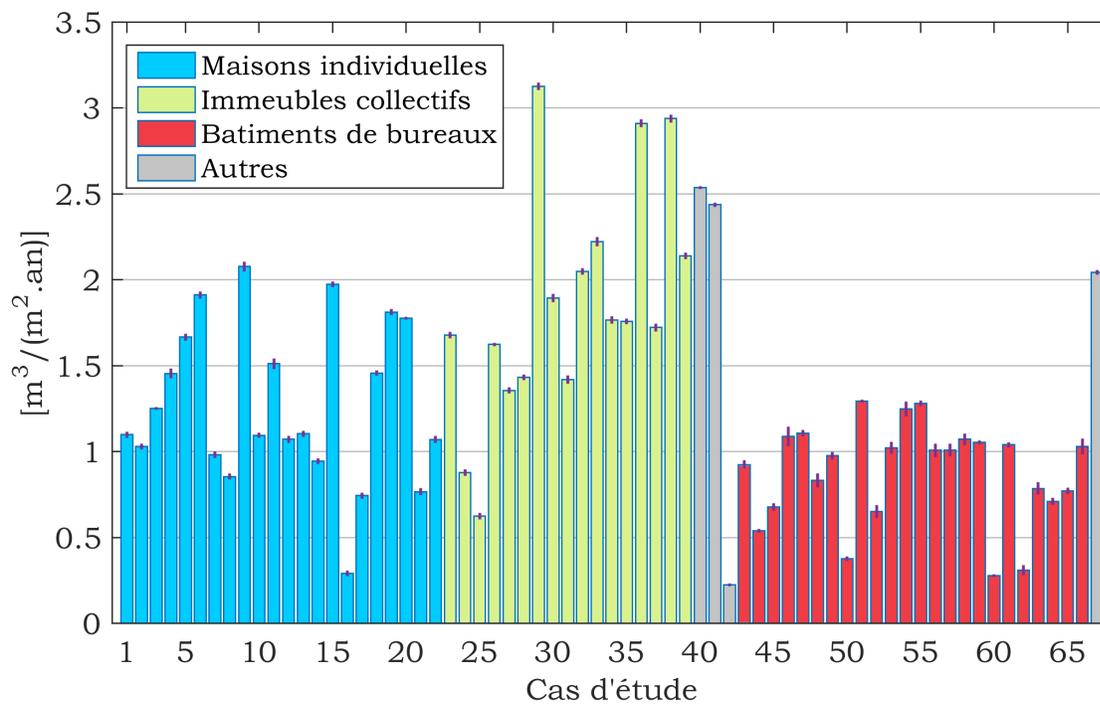


FIGURE C.9 – Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du bâtiment pour l'utilisation nette d'eau douce

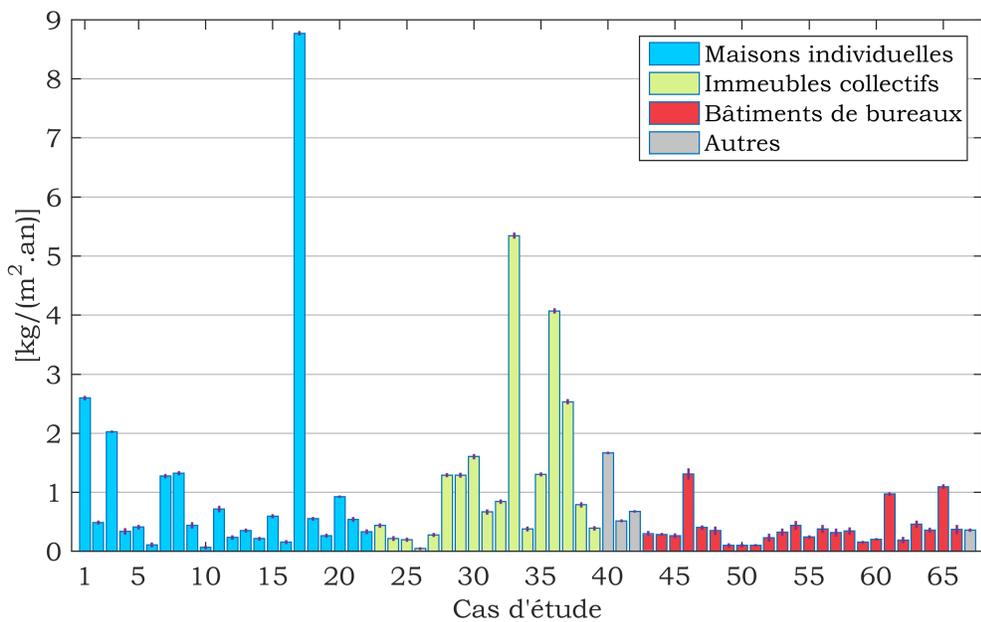


FIGURE C.10 – Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du bâtiment pour les déchets dangereux

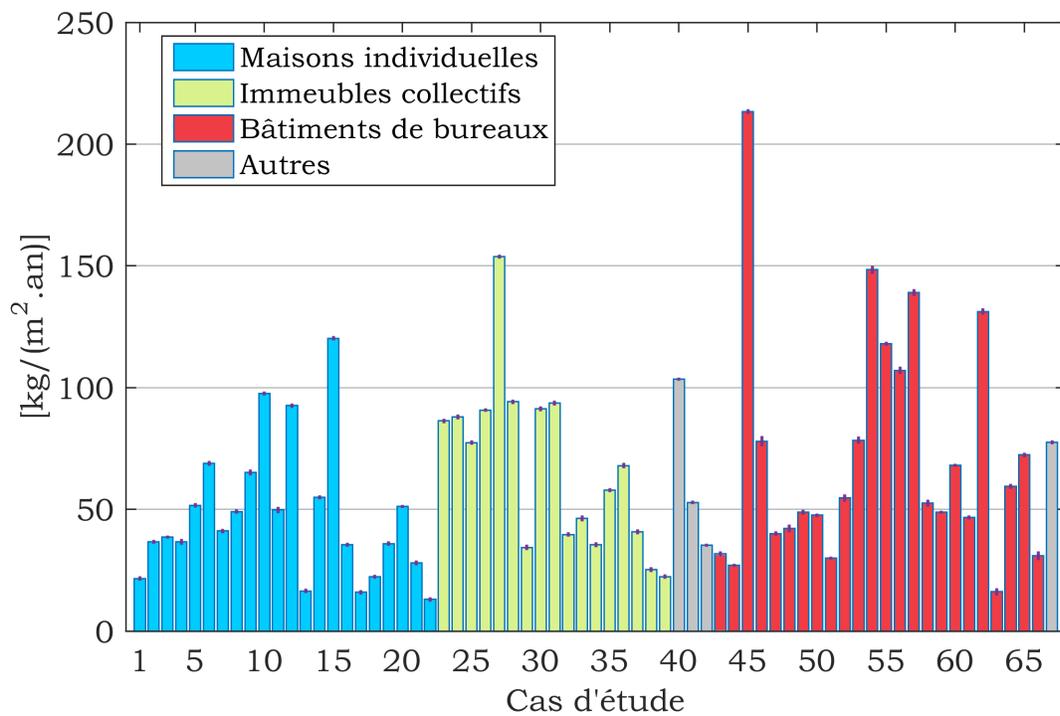


FIGURE C.11 – Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du bâtiment pour les déchets non dangereux

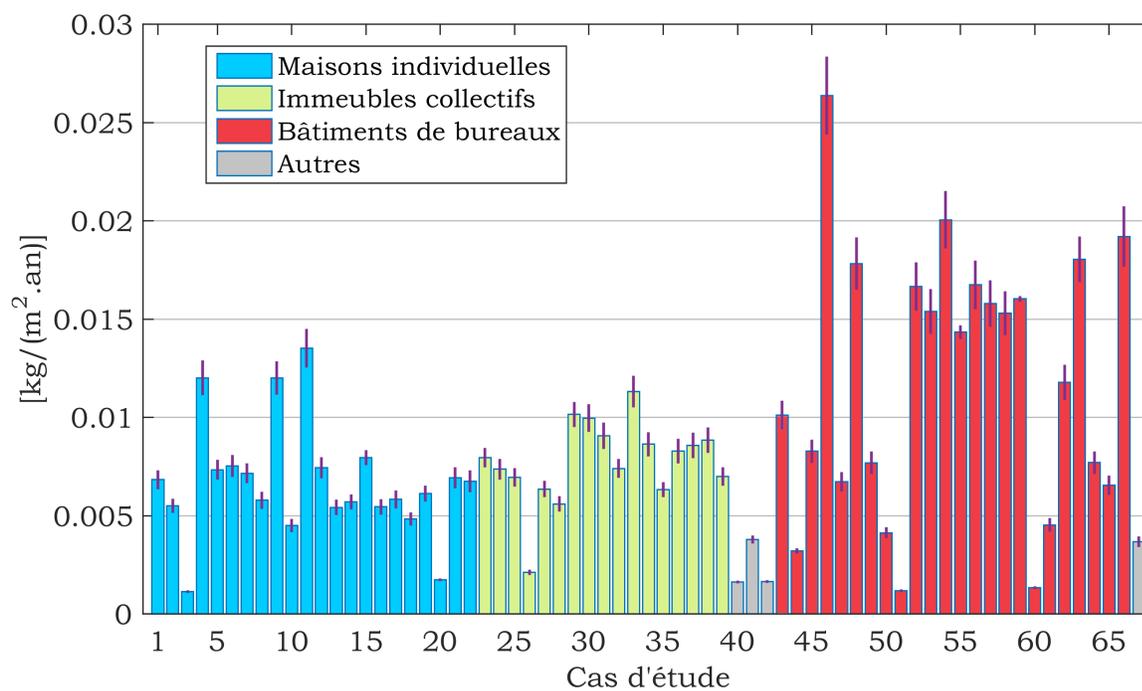


FIGURE C.12 – Sensibilité des résultats à la variabilité du mix électrique à l'échelle du bâtiment pour les déchets radioactifs

Résumé

Depuis 1974, date de l'apparition des exigences thermiques sur les bâtiments en France, les réglementations thermiques n'ont cessé d'évoluer pour rendre les bâtiments de plus en plus performants énergétiquement. Aujourd'hui, il apparaît nécessaire d'introduire d'autres indicateurs que la seule consommation d'énergie comme critère de performance d'un bâtiment. L'évaluation environnementale des bâtiments se base sur l'analyse de cycle de vie (ACV). A l'heure actuelle, il existe différents logiciels dédiés à l'ACV bâtiment avec leurs données, leurs méthodologies et leurs indicateurs propres. Par ailleurs, le développement des bâtiments producteurs d'énergie et des systèmes de gestion de la demande électrique soulève de nouvelles problématiques. En effet, l'approche actuelle en ACV tend à utiliser des résultats de simulations thermiques agrégés à l'année alors que pour évaluer les avantages et inconvénients de tels systèmes une granulométrie temporelle plus fine est plus adaptée. Les travaux de cette thèse portent plus particulièrement sur le calcul des impacts environnementaux de la consommation d'énergie en phase d'utilisation et visent à répondre aux problématiques suivantes :

- Quelles sont les caractéristiques temporelles et spatiales à prendre en compte dans le bilan énergétique pour son utilisation dans l'évaluation environnementale des consommations d'énergie lors de la phase d'utilisation ?
- Quelles doivent être les caractéristiques temporelles des données environnementales utilisées pour l'évaluation ?
- Comment exprimer et afficher les résultats des impacts liés à cette utilisation d'énergie ?

Ainsi, pour les bâtiments producteurs d'énergie, l'échelle de temps à laquelle doit être effectué le bilan énergétique (calcul import/export/autoconsommation) pour évaluer de manière correcte les impacts environnementaux liés à l'usage d'énergie est identifiée. De plus, un bâtiment peut utiliser des énergies renouvelables en profitant de la synergie que peut créer un ensemble de bâtiments, (mutualisation des productions en utilisant les meilleurs emplacements, foisonnement des consommations qui permet une éventuelle meilleure autoconsommation de la production). La manière dont le bilan import/export doit être effectué dans ce cas est déterminée. Les variabilités temporelles et spatiales des mix énergétiques utilisés dans le bâtiment à court et moyen terme sont caractérisées pour mettre en évidence leur influence sur les impacts environnementaux. Puis, l'utilisation de facteurs de caractérisation dynamique sur des cas d'études permet de mieux cerner les potentialités de l'ACV dynamique dans le bâtiment. Enfin, les différences dues aux méthodologies de prise en compte de l'énergie produite localement sur l'expression des résultats d'ACV sont présentées. Par ailleurs, la sensibilité des résultats d'ACV et des valeurs de référence à la variabilité de la donnée environnementale du mix électrique est exposée.

Mots clés : Évaluation, Impacts environnementaux, Performance énergétique, Analyse de cycle de vie, BEPOS

Abstract

In France, since 1974 when the first thermal regulation on buildings appeared, thermal regulations have never stopped evolving in order to make more and more energy efficient buildings. Today, it is necessary to add new indicators, and not only energy, to describe building performance. Life Cycle Assessment (LCA) is the basis for buildings environmental assessment. Several building LCA software currently exist ; they have their own methodologies and indicators. Besides, the development of buildings producing energy and of electrical load management systems raises new questions. Indeed, the current LCA practice use results from dynamic energy simulation at yearly level whereas assessing benefits and drawbacks of such systems has to be done with a smaller time step. This thesis is particularly focused on the calculation of the environmental impacts from energy consumption during the building use phase and aims to answer the following questions :

- Which are the temporal and spatial features to take into account for the energy balance used in the assessment of energy consumption during the building life cycle ?
- Which are the temporal features of the environmental data used in the assessment ?
- How can you express and display impacts linked to energy use ?

Thus, for buildings producing energy, the time step that should be used for the energy balance (i.e. differentiation between energy consumed on site, exported and imported) in order to assess properly environmental impacts of energy consumption is identified. Moreover, a building can benefit from renewable energy sharing and thus, the way to realize the energy balance for building block is determined. Temporal (short and long term) and spatial variations of energy mixes used in a building are characterized in order to show their influence on the environmental impacts. Then, the use of dynamic characterisation factors on case studies allows to better understand the potentials of dynamic LCA for buildings. Last but not least, the differences between methodologies to handle onsite energy production on the results are presented. Besides, the sensibility of the LCA results and reference values to the variation of the electricity mix environmental data is displayed.

Keywords : Evaluation, Environmental impacts, Energy efficiency, Life Cycle Assessment, Plus energy building