



HAL
open science

Analyse de cycle de vie conséquentielle appliquée aux ensembles bâtis

Charlotte Roux

► **To cite this version:**

Charlotte Roux. Analyse de cycle de vie conséquentielle appliquée aux ensembles bâtis. Construction durable. Université Paris sciences et lettres, 2016. Français. NNT : 2016PSLEM043 . tel-01647882

HAL Id: tel-01647882

<https://pastel.hal.science/tel-01647882>

Submitted on 24 Nov 2017

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 DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres
PSL Research University

Préparée à MINES ParisTech

Analyse de cycle de vie conséquentielle appliquée aux ensembles bâtis

École doctorale n°432

SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR

Spécialité ÉNERGÉTIQUE ET PROCÉDÉS

Soutenue par **Charlotte ROUX**
le 26 Septembre 2016

Dirigée par **Bruno PEUPORTIER**
Co-encadrée par **Patrick SCHALBART**



COMPOSITION DU JURY :

Prof. Cécile BULLE
CIRAIG – Université de Montréal, Présidente

Prof. Niklaus KOHLER
Universität Karlsruhe, Rapporteur

Prof. Patrick ROUSSEAU
IRIAF, Université de Poitiers, Rapporteur

Prof. Isabelle BLANC-SOMMEREUX
Centre OIE – MINES ParisTech, Membre du jury

Dr. Adélaïde FERAILLE, HDR
École des Ponts - ParisTech, Membre du jury

Dr. Christophe GOBIN
VINCI Construction France, Membre du jury

Dr. Bruno PEUPORTIER, HDR
CES, MINES ParisTech, Membre du jury

Dr. Patrick SCHALBART
CES, MINES ParisTech, Membre du jury

A chaque question subtile et complexe, il existe une réponse parfaitement simple et directe, qui est fausse.

H.L. Mencken (la phrase est belle, l'homme l'était moins)

REMERCIEMENTS

Ce n'est pas la page la plus ardue à écrire dans une thèse mais pourtant c'est celle qui m'a pris le plus de temps. Comment remercier tous ceux qui doivent l'être sans dépasser une page de manuscrit ? Comment être sûre de n'oublier personne ? Le jour où j'ai renoncé à répondre à ces deux questions, la rédaction de l'ultime page de cette thèse a débuté.

D'abord, merci à mes encadrants de thèse. Merci Bruno pour m'avoir laissé creuser certaines de mes lubies farfelues et m'avoir remise dans le droit chemin quand c'était nécessaire. Merci Patrick pour avoir gratouillé les recoins de chaque modèle et hypothèse avec moi et pour m'avoir redonné confiance quand j'en avais besoin. Et merci pour la chanson.

Merci aux rapporteurs et aux membres du jury pour les fructueux échanges, les conseils, les perspectives qui se sont ouvertes grâce à vous et à vos questions. Un clin d'œil spécial à Isabelle et Adélaïde, avec qui j'ai eu la chance d'échanger de façon régulière au cours de ces trois ans et dont les qualités humaines et scientifiques m'ont été très précieuses.

Merci à tous les gens qui sont intervenus dans ces travaux et ont donné de leur temps pour m'aider à progresser : Jean-Marc Roudergue (RTE), Aude Lemonsu (MétéoFrance), Eric Vidalenc (ADEME) etc. Merci à tous les membres de la chaire écoconception, c'était un réel plaisir de travailler avec vous, j'ai appris énormément à vos côtés. Merci à Anne pour partager mon engouement pour toute question relative à l'agriculture urbaine, merci à Baptiste et Anne-Cécile pour les réponses. Merci les collègues, les doctorants, les anciens doctorants, les post-doctorants, les stagiaires, les encore là, les déjà partis, les partis pas très loin... Merci pour cet équilibre entre légèreté et questions existentielles, entre Java et convergence, entre Pantalon et inversion matricielle. Merci Greg pour le passage de flambeau et le chat, merci Fabio pour croire en la terre crue autant que moi. Bérenger, Eric, Max, Thomas, Guillaume, Josselin, MLP, Marie, Simon, Michaël, Durca et les autres, que l'esprit ETB vous accompagne dans la suite de vos aventures.

Merci à vous les palaisiens, merci à vous les parisiens, merci à vous Mirka et Florence, merci à vous Johanna, Fatia, Norma, Suzanne, Alain, Ange, etc. Grâce à vous j'ai déambulé avec joie dans les couloirs de l'école, papoté en espagnol ou français, appris des mots en arabe, bu les meilleurs cafés du monde.

Merci à la famille, aux copains, aux colocs, à ma fanfare chérie. Quand on décolle son nez de l'ordinateur, vous êtes là, pour un grand bol de joie, de musique, d'optimisme, de fêtes, d'idées géniales pour un monde meilleur. Merci à ceux qui sont venus à la présentation de thèse avec la certitude qu'ils ne comprendraient rien pendant deux heures : François, Mimi. Merci à celle qui est venue de loin et qui mériterait un chapitre entier de remerciements : Claire. Merci à Vi, ma grande sœur de recherche, pour les nombreuses heures de soutien neewbe et pour la (re)découverte de la crotte en chocolat. Merci à ceux qui ont réussi à venir au pot malgré leur vie bien remplie. Merci la famille, je ne vous le dirais jamais assez, et comme on s'auto-rape à la maison, merci de vous auto-remercier autant de fois que nécessaire (i.e. beaucoup !). Last but not least : merci Denis, pour tout.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	IV
TABLE DES MATIÈRES.....	2
Liste des figures.....	4
Liste des tableaux	14
NOMENCLATURE.....	18
EXECUTIVE SUMMARY	24
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	28
CHAPITRE 1. ÉTAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT DU SUJET DE THÈSE	32
1.1. ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES BÂTIMENTS ET DES QUARTIERS	34
1.2. APPROCHE CONSÉQUENTIELLE EN ACV.....	48
1.3. LA QUESTION TEMPORELLE EN ANALYSE DE CYCLE DE VIE	68
1.4. ENJEUX PROSPECTIFS	73
1.5. DU BÂTIMENT AU QUARTIER.....	85
1.6. CONCLUSION DU CHAPITRE	88
CHAPITRE 2. MODÉLISATION DYNAMIQUE DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE	90
2.1. INTRODUCTION	92
2.2. PRINCIPE DE LA MODÉLISATION	93
2.3. LA DEMANDE À SATISFAIRE.....	97
2.4. MODÉLISATION DES MOYENS DE PRODUCTION.....	111
2.5. VALIDATION GÉNÉRALE ET RÉSULTATS DU MODÈLE	155
2.6. DISCUSSION ET CONCLUSION DU CHAPITRE.....	165
CHAPITRE 3. ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX –COURT TERME	168
3.1. INTRODUCTION	170
3.2. INVENTAIRES D'ÉMISSIONS ET DE RESSOURCES	172
3.3. APPROCHE ATTRIBUTIONNELLE DYNAMIQUE	181
3.4. APPROCHES CONSÉQUENTIELLES COURT TERME.....	192
3.5. APPLICATION SUR UNE ÉTUDE DE CAS SIMPLE.....	202
3.6. CONCLUSIONS DU CHAPITRE	235
CHAPITRE 4. VERS UNE APPROCHE PROSPECTIVE POUR L'ÉCOCONCEPTION DES ENSEMBLES BÂTIS .	236
4.1. INTRODUCTION	238
4.2. ÉVOLUTION CLIMATIQUE	242
4.3. ÉVOLUTION TECHNOLOGIQUE.....	254
4.4. CALCULS DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	268
4.5. RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES.....	273
4.6. ÉTUDE DE CAS SIMPLE.....	277
4.7. CONCLUSION DU CHAPITRE	286
CHAPITRE 5. DU BÂTIMENT AU QUARTIER : TRANSPORTS ET DÉCHETS MÉNAGERS	288

5.1.	INTRODUCTION	290
5.2.	LE TRANSPORT QUOTIDIEN DES OCCUPANTS	290
5.3.	LE TRAITEMENT DES DÉCHETS MÉNAGERS	316
5.4.	CONCLUSION DU CHAPITRE	342
CHAPITRE 6. ÉTUDE DE CAS : LA CITÉ DESCARTES		344
6.1.	INTRODUCTION	346
6.2.	CITÉ DESCARTES.....	347
6.3.	CONCLUSION DU CHAPITRE	387
CONCLUSIONS DE LA THÈSE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE.....		388
CONFÉRENCES ET ARTICLES À COMITÉS DE LECTURE		394
BIBLIOGRAPHIE		396
ANNEXES		422
ANNEXE A.	APPROCHES ECONOMIQUES EN ACV.....	424
ANNEXE B.	RECYCLAGE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION, POLSTER 1995	430
ANNEXE C.	PONDÉRATION DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUE RTE	438
ANNEXE D.	DÉTERMINATION DU GRADIENT.....	440
ANNEXE E.	CALCUL DES COEFFICIENTS DE MODULATION DE LA CONSOMMATION NATIONALE	442
ANNEXE F.	ÉTUDE DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES RT2012	444
ANNEXE G.	CAPACITÉS INSTALLÉES PRÉVUES POUR 2014.....	446
ANNEXE H.	CONSTRUCTION DE LA COURBE D'USAGE POUR L'HYDRAULIQUE DE LAC	448
ANNEXE I.	OBSERVATION DE LA PRODUCTION HISTORIQUE.....	452
ANNEXE J.	INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE ÉCOINVENT V3 APOS.....	456
ANNEXE K.	PRÉSENTATION DE LA CHAÎNE LOGICIELLE ALCYONE-PLÉIADES+COMFIE-NOVAEQUER..	458
ANNEXE L.	COMPOSITIONS DES PAROIS DES MAISONS I-BB ET I-OB (PANNIER, 2014).....	466
ANNEXE M.	FACTEURS DE CARACTÉRISATION DES ÉMISSIONS DE CO₂, NO_x ET PM	472
ANNEXE N.	REPRÉSENTATIONS SCHÉMATIQUES DU RECYCLAGE ET DE LA VALORISATION MATIÈRE	474
ANNEXE O.	INCINÉRATION DES DÉCHETS MÉNAGERS	476
ANNEXE P.	PARC ROULANT DES VÉHICULES PARTICULIERS.....	494
ANNEXE Q.	CARACTÉRISATION DES DÉCHETS	496
ANNEXE R.	INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES, TRANSPORT	499
ANNEXE S.	RÉSULTATS DÉTAILLÉS : TRANSPORT	501
ANNEXE T.	RÉSULTATS DÉTAILLÉS, PROSPECTIVE.....	503
ANNEXE U.	MEETING REPORT: INTERNATIONAL SEMINAR ON RELEVANT ENVIRONMENTAL INDICATORS FOR LCA APPLICATIONS IN URBAN PROJECTS	505

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Méthodologie de l'ACV, ILCD Handbook, adapté de ISO 14040 : 2006.....	34
Figure 2 : Catégorie d'impact et voie d'impact couverte par la méthodologie ReCiPe, extrait de (EC-JRC, 2010)	40
Figure 3 : Occupation et Transformation des sols, Milà y Canals 2007.....	46
Figure 4 : Illustration du concept d'allocation par expansion du système (Source : Suh et al. (2010)).....	54
Figure 5 : ACVA (gauche) et ACVC, adapté de Weidema (2003)	67
Figure 6 : Diagramme conceptuel de l'ACV dynamique, extrait de Collinge et al. 2013 ...	68
Figure 7 : Incohérence du cadre temporel en ACV statique (Source : Levasseur et al.)...	71
Figure 8: Famille de modèles de prospective intégrant énergie, économie et environnement	76
Figure 9 : Évolution possible des degrés-jours unifiés de chauffe (HDD) et de refroidissement (CDD) en région parisienne à l'horizon 2100 (Lemonsu et al., 2012)	81
Figure 10 : De l'ACV bâtiment à l'ACV quartier (Lotteau et al., 2015).....	85
Figure 11 : Principe de la modélisation simplifiée du système de production d'électricité .	94
Figure 12 : Détermination de la consommation nationale	99
Figure 13 : Zones de la réglementation thermique 2012.....	100
Figure 14 : Température nationale "type"	101
Figure 15: Consommation nationale "type", part thermosensible et part non thermosensible	102
Figure 16 : Consommation restante (consommation nationale moins productions fatales) 2012-2013 en fonction du solde des échanges.....	104
Figure 17 : Diagramme Entrée-Sortie - Modèle Export.....	105
Figure 18 : Niveau des échanges aux frontières (<0 : Export, >0 : Import), première semaine de mars 2013.....	106
Figure 19 : Modélisation des échanges, validation sur 2013	107
Figure 20 : Appel des STEP en pompage et consommation nationale sur une semaine fin Janvier 2012	108
Figure 21 : Y (valeur réelle 2013) et les trois modèles F(X) pour approcher Y	110
Figure 22 : Facteur de charge horaire éolien sur 2012/2013.....	114
Figure 23 : Fonction de transfert d'une éolienne de 2MW (SER, 2012)	115
Figure 24 : Modélisation du facteur de charge éolien journalier moyen sur 2013.....	116

Figure 25 : Procédure de détermination du facteur de charge éolien "type"	117
Figure 26 : Production éolienne, janvier 2014	118
Figure 27 : Production éolienne, biais moyen sur les heures	119
Figure 28 : Facteur de charge horaire « type » modélisé.....	119
Figure 29 : Rayonnement sur une surface inclinée à 30°	120
Figure 30 : Production fatale décentralisée Déchets, Biomasse et Biogaz, en 2013	122
Figure 31 : Facteur de charge horaire 2012-2013 et facteur de charge « type » pour la production décentralisée « renouvelable » (Déchets, Biomasse et Biogaz).....	123
Figure 32 : Production totale (centralisée et décentralisée) au fioul (haut) et gaz (bas) en 2012.....	124
Figure 33 : Données Eco2Mix de production Fioul (a) et Gaz (b) en 2012 et 2013.....	125
Figure 34 : Puissance moyenne produite par la cogénération entre 2009 et 2018 en hiver, source (RTE 2013)	126
Figure 35 : Facteur de charge horaire « type » cogénération gaz.....	126
Figure 36 : Production hydroélectrique moyenne en France (source: SER)	127
Figure 37 : Production hydraulique mensuelle minimale sur 2012.....	128
Figure 38 : Production hydraulique sur une journée, extrait du premier trimestre 2013	130
Figure 39 : Capacité disponible des centrales fil de l'eau et éclusées pour 2010 à 2013 et moyenne	131
Figure 40 : Facteur de charge hydraulique fil de l'eau modélisée	132
Figure 41 : Disponibilité des centrales nucléaires, source RTE	135
Figure 42: Historique de la production hydroélectrique en France.....	138
Figure 43 : Détermination du productible hydraulique, Courbe d'usage.....	140
Figure 44 : Évolution des coûts marginaux des centrales au gaz et au charbon, source RTE	142
Figure 45 : Performance du modèle sur l'évaluation du potentiel de réchauffement global	157
Figure 46 : Répartition des erreurs absolues et relatives sur la modélisation de la demande de 2014.....	159
Figure 47 : Demande réelle et demande modélisée pour l'année 2014	159
Figure 48 : Modélisation de la production hydraulique 2014.....	161
Figure 49 : Production fossile décentralisée, données réelles 2014 (1 janvier - 15 décembre)	162
Figure 50 : Production thermique renouvelable décentralisée et erreur de modélisation	162

Figure 51 : Potentiel de réchauffement global par usage et moyenne annuelle sur 2014	163
Figure 52 : Diagramme du procédé de production d'un kWh délivré sur le réseau basse tension (BT)	173
Figure 53 : Fourniture d'un kWh sur le réseau BT par une technologie reliée au réseau HT (haut) ou BT (bas)	174
Figure 54 : Potentiel de réchauffement global par kWh par technologie	178
Figure 55 : Consommation d'eau par kWh par technologie	178
Figure 56 : Déchets radioactifs par kWh par technologie	178
Figure 57 : Méthodologie de l'approche attributionnelle dynamique	182
Figure 58 : Schématisation de l'allocation de l'impact lié aux STEP	184
Figure 59 : Variation de la valeur des indicateurs par kWh fourni au cours d'une année (en % de la moyenne annuelle).....	188
Figure 60 : Comparaison du facteur d'émission de gaz à effet de serre moyen par kWh fourni (gCO ₂ .kWh ⁻¹) *Procédé ecoinvent : market for electricity, low voltage [FR] (basé sur l'année 2008).....	189
Figure 61 : Les 4 étapes de la méthodologies GHG-P	195
Figure 62 : Méthodologie de l'approche conséquentielle marginale court terme.....	196
Figure 63 : Impacts environnementaux des méthodes marginales GHG-P par rapport à la méthode « dérivée » (base 100).....	198
Figure 64 : Les phases du cycle de vie d'un bâtiment, extrait de Polster (B. Polster, 1995).....	202
Figure 65 : Présentation de la chaîne logicielle	203
Figure 66 : Structure de l'implémentation informatique	205
Figure 67 : Photo des trois premières maisons construites sur la plateforme INCAS.....	206
Figure 68 : Plan des Maisons INCAS, (Pannier, 2014)	207
Figure 69 : Zonage thermique des Maisons INCAS.....	208
Figure 70 : Production photovoltaïque mensuelle (kWh).....	211
Figure 71 : Besoins mensuels en électricité (kWh) pour l'ECS avec et sans système solaire	211
Figure 72 : Cycle de vie des matériaux inertes et frontières du système selon l'approche de modélisation	213
Figure 73 : Cycle de vie des matériaux bois et frontières du système selon l'approche de modélisation	214
Figure 74 : Analyse de contribution de la maison IBB de référence en ACVA (haut) et ACVC (bas).....	217

Figure 75 : Bilan environnemental normalisé en ACVA (bleu) et ACVC (rouge)	219
Figure 76 : Comparaison de variantes constructives bois (IOB) et béton (IBB) en ACVA (haut) et ACVC (bas)	220
Figure 77 : Indicateurs au profil similaire en ACVA (haut) ou ACVC (bas) pour la comparaison des systèmes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire. Valeur des indicateurs exprimée par rapport à la variante électricité (= 100 %)	223
Figure 78 : Indicateurs fortement impactés par le choix de l'approche ACVA ou ACVC pour la comparaison des systèmes de chauffage. Valeur des indicateurs exprimée par rapport à la variante électricité (= 100)	224
Figure 79 : Évaluation de l'intérêt environnemental du système de production d'électricité photovoltaïque par l'approche ACVA (en haut) ou ACVC (en bas).....	225
Figure 80 : Bilan environnemental de l'eau chaude solaire (production d'eau chaude+équipement), avec un ballon à accumulation électrique (ECS ACC) ou un système combiné solaire thermique et électricité (ECS solaire- CESI) en ACVA (haut) et ACVC (bas)	226
Figure 81 : Modification du bilan environnemental obtenu en passant du chauffage et ECS électrique à une cogénération bois (CHP), exprimée en équivalent-habitant année. Une valeur positive indique que la cogénération génère plus d'impact que l'électricité	227
Figure 82 : Echantillonnage des paramètres d'entrée incertains pour 6000 tirages.....	231
Figure 83 : Incertitude sur l'empreinte carbone par kWh du mix annuel moyen (ACVA) et du mix marginal pour une demande constante (ACVC), 6000 tirages.....	232
Figure 84 : Distribution de probabilité de l'empreinte carbone du kWh marginal en fonction de la chronologie de disponibilité nucléaire (année 2010 à 2014)	233
Figure 85 : Contextualisation des quatre orientations possibles pour les scénarios d'évolution de l'arrière-plan	241
Figure 86 : Évaluation du projet à différents horizons temporels.....	241
Figure 87 : Évolution des émissions de dioxyde de carbone anthropogénique (haut) et augmentation de la température moyenne de la terre (bas) pour les scénarios RCP (Allen et al., 2014).....	243
Figure 88 : Écarts de température par rapport à la moyenne de référence 1976-2005, pour le modèle Aladin-Climat et les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5, en moyenne estivale et hivernale aux horizons 2021-2050 et 2071-2100 (Ouzeau et al., 2014)	244
Figure 89 : Séries horaires de températures, Station Chartres, en climat passé (bleu) et futur (rouge)	246
Figure 90 : Anomalie de température moyenne quotidienne (moyenne annuelle) : écart entre la période considérée et la période de référence (°C), Météo-France/CNRM2014 : modèle Aladin de Météo-France, source : DRIAS	247

Figure 91 : Morphing appliqué à la station de Trappes, scénarios RCP4.5, horizon 2071-2100.....	249
Figure 92: Données météorologiques pour les différents scénarios	250
Figure 93 : Effets du réchauffement climatique sur les impacts environnementaux du mix annuel moyen	252
Figure 94 : Structure générale du modèle MARKAL, (Assoumou, 2006)	255
Figure 95 : Hypothèses structurantes pour la demande en électricité pour différents scénarios contrastés, (Assoumou et al., 2015)	256
Figure 96 : Profil de TWh marginal de demande M1 à M4, (Assoumou et al., 2015)	257
Figure 97 : Variabilités du contenu CO ₂ avec un bruit marginal : scénario C, (Assoumou et al., 2015)	258
Figure 98 : Production d'électricité à l'horizon 2020 (haut), 2030 (milieu) et 2050 (bas) pour le scénario technologique A (type « Business as usual » avec un budget CO ₂ annuel constant)	259
Figure 99 : Production d'électricité à l'horizon 2020 (haut), 2030 (milieu) et 2050 (bas) pour le scénario technologique B (type « taxe carbone forte »)	260
Figure 100 : Mix annuel moyen et mix marginal - méthode GHG-P - pour les scénarios prospectifs d'évolution technologique (A : BAU, B : taxe carbone).....	262
Figure 101 : Scénarios prospectifs RTE à l'horizon 2030, Bilan prévisionnel RTE 2014, p180	263
Figure 102 : Mix électrique et réseau de gaz à l'horizon 2050 - ADEME - Scénario 1/3	265
Figure 103 : Exemple de représentation de la synthèse des impacts pour les différents scénarios, méthode prospective	269
Figure 104 : DJU de chauffe (rouge) et de refroidissement (bleu), présent et futur RCP 4.5 (Scénario 2) ou RCP 8.5 (Scénario 1)	273
Figure 105 : Potentiel de réchauffement global des mix prospectifs moyens (a) et marginaux (b), moyenne annuel et écart type observé sur l'année (écart type des valeurs horaires) pour les deux scénarios d'évolutions technologiques (A : BAU, B : taxe carbone)	275
Figure 106 : Contribution à l'effet de serre pour l'ensemble du cycle de vie de la maison IBB, selon les 4 scénarios étudiés	280
Figure 107 : Comparaison de la contribution à l'effet de serre pour les variantes gaz et électricité, selon les 4 scénarios étudiés, suivant l'approche ACVA (gauche) et ACVC (droite)	280
Figure 108 : Production annuelle du système PV selon les données météorologiques utilisées	282
Figure 109 : Bilan de la production et de la consommation d'électricité selon les différents scénarios d'évolution climatique (1 : changement climatique fort, 2 : changement climatique contenu)	283

Figure 110 : Intérêt environnemental du système PV sur l'effet de serre selon l'approche choisie, ACVA (haut) ou ACVC (bas)	284
Figure 111 : Comparaison de l'effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie des variantes de base et variante avec PV pour les différents scénarios, selon l'approche ACVA (gauche) ou ACVC (droite).....	285
Figure 112 : Schéma général de la procédure d'intégration des outils ACV et transport .	291
Figure 113 : Principe des outils dits "en 4 étapes", figure transmise par Natalia Kotelnikova	292
Figure 114 : Affinement spatial du modèle pour l'étude des quartiers, (Vanhille, 2015)	293
Figure 115 : Distribution des flux: sortants du quartier (gauche) ou interne (droite) au quartier, (Vanhille, 2015)	294
Figure 116 : Évaluation des émissions de NO _x générées par les flux d'un quartier en Île de France, (Vanhille, 2015)	295
Figure 117 : Émissions de NO _x des VP diesel en fonction de la vitesse, source (SETRA, 2009)	295
Figure 118 : Structure de la modélisation du transport voiture dans ecoinvent v3 adapté de (Simons, 2013) et données accessibles (vertes), partiellement accessibles (orange) ou non accessibles (rouge) grâce au modèle de simulation transport.....	297
Figure 119 : Objectifs de l'étude et frontières du système pour une ACV-mobilité	298
Figure 120 : Contribution des différentes étapes du cycle de vie pour une petite voiture diesel (haut) et essence (bas) EURO 3, méthode Eco-indicator 99, source : ecoinvent v3.2.	303
Figure 121 : Part des émissions directes et part des Nox, PM et CO ₂ dans l'impact total pour une voiture essence (a) et une voiture diesel (b).....	304
Figure 122 : Émissions directes de CO ₂ et de particules fines en fonction de la taille et de la norme du véhicule (données extraites de la base ecoinvent v3.2). Véhicule type considéré : 70 % diesel, 30 % essence	307
Figure 123 : Impacts environnementaux par bus.km initialement contenus dans la base de données et corrigés grâce au modèle de transport.....	311
Figure 124 : Impacts environnementaux des bus par passager.km en fonction du taux de remplissage du bus.....	312
Figure 125 : Résumé de la procédure de détermination des impacts transport	315
Figure 126 : Vision systémique du quartier - déchets vs besoins énergétiques.....	317
Figure 127 : Variabilité des impacts environnementaux selon le type de déchet incinéré	323
Figure 128 : Impacts minimaux, maximaux et moyens normalisés, pour 10 tonnes de déchets incinérés, étude sur 55 procédés de traitement de déchets solides	325

Figure 129 : Impacts potentiel de réchauffement global et dommages à la santé humaine par kg de déchets incinéré, pour 11 procédés représentatifs.....	326
Figure 130 : Comparaison de la prise en compte des substances toxiques et écotoxiques pour l'incinération du bois traité et non traité dans les méthodes de caractérisation EI99 et USETox.....	327
Figure 131 : Évaluation des impacts des chaudières gaz et fioul (en habitant-équivalent année/MJ utile).....	330
Figure 132 : Impacts environnementaux de la production d'électricité (équivalent habitant par kWh)	331
Figure 133 : Bilan d'une incinération avec récupération d'énergie sur du fioul	333
Figure 134 : Impact PRG selon le combustible évité.....	334
Figure 135 : Évaluation des impacts PRG et DALYs avec un mix moyen ou un mix marginal	335
Figure 136 : Bilan environnemental de la cogénération (potentiel de réchauffement global et santé humaine) - Impacts évités : mix d'électricité marginal et chaleur à base de fioul.....	336
Figure 137 : Synthèse mensuelle des besoins énergétiques en chauffage et ECS et de la chaleur finale générée par l'incinération des déchets	338
Figure 138 : Conséquences environnementales du raccordement des nouveaux logements au réseau de chaleur (Réseau) ou de l'installation de chaudières collectives (Chaudière) selon la situation de l'incinérateur (production de base complétée par le gaz toute l'année – scénario 1 ou production en surplus d'été et complément gaz seulement en hiver – scénario 2)	339
Figure 139 : Conséquences de la mise en place d'un compost collectif.....	340
Figure 140 : Bilan de la variation des impacts pour une tonne de déchets ménagers compostés pour le scénario 1 (gaz marginal toute l'année sur le réseau de chaleur) et le scénario 2 (gaz marginal seulement en hiver).....	341
Figure 141 : Situation géographique du cluster Cité Descartes, (source : http://marne.artefacto.fr/?l=fr)	347
Figure 142 : Projet d'aménagement du nord du Boulevard du Ru de Nesles : zone étudiée entourée en orange. (tirée de Mailhac, 2015)	348
Figure 143 : Saisie graphique du projet avec Alcyone	349
Figure 144 : Scénario hebdomadaire d'apports internes, moyenne pour 100 logements sur une année, comparaison entre le modèle statistique de Vorger (bleu) et la réglementation thermique RT2012 (noir). Figure extraite de (Vorger, 2014), p.344	351
Figure 145 : Production photovoltaïque mensuelle pour l'année météo type, station de Trappes (RT2012)	352

Figure 146 : Bilan mensuel des besoins (haut) et consommations d'énergies finales (bas) sur l'ensemble des zones, variante BBC/BBC+PV (gauche) et PAS+PV (droite).....	354
Figure 147 : Cité Descartes élargie et emplacement du projet étudié (entouré en rouge)	355
Figure 148 : Distance parcourue par usager par mode. Les moyennes EGT 2008 AU Paris et Banlieue Paris correspondent respectivement à 38 km et 22 km par personne par jour ouvrable de semaine et 253 jours ouvrables de semaine par an	356
Figure 149 : Approches ACVA (recycled content approach ou cut-off) et approche ACVC (end of life recycling ou system expansion), extrait de Gomes et al. (2013)	361
Figure 150 : Analyse de contribution à l'échelle du quartier, impacts normalisés, exprimés par attribut (usager du quartier) par an en ACVC-P (haut) ou ACVA (bas).....	367
Figure 151 : Variante programmatique : mixité des îlots, programme de référence peu mixte (gauche) et variante mixte (droite), (figure fournie par l'institut de recherche Efficacy)	369
Figure 152 : Flux par mode pour le projet initial (Référence) et la variante (Variante) programmatique (figure fournie par l'institut de recherche Efficacy).	369
Figure 153 : Distance annuelle parcourue par les VP par attribut pour le projet initial et la variante programmatique	370
Figure 154 : Effet du zonage mixte sur les performances environnementales du projet	371
Figure 155 : Analyse de contribution du traitement des déchets, par type de déchets, impacts normalisés	372
Figure 156 : Impact du traitement des plastiques, Analyse de contribution selon les types de traitement.....	373
Figure 157 : Consommation d'énergie finale pour le chauffage (gauche) et la climatisation (droite) en fonction du scénario climatique : RT2012 (2012), RCP 4.5 ou RCP 8.5	374
Figure 158 : Comparaison des variantes énergétiques, ACVC-P	376
Figure 159 : Comparaison des variantes, valeurs normalisées, ACVC-P	377
Figure 160 : Comparaison des variantes énergétiques, ACVA	378
Figure 161 : Comparaison des variantes, ACVA, valeurs normalisées.....	379
Figure 162 : Hypothèses générales pour l'étude prospective	380
Figure 163 : Indicateurs d'effet de serre, de déchets radioactifs, de ressources abiotiques et de santé humaine, pour les quatre scénarios et les trois variantes de conception de l'enveloppe, ACVC-P.....	381
Figure 164 : Indicateurs d'effet de serre, de déchets radioactifs, de ressources abiotiques et de santé humaine, pour les quatre scénarios et les trois variantes de conception de l'enveloppe, ACVA.....	382

Figure 165 : Comparaison des bétons et des aciers dans les trois systèmes de modélisation ecoinvent v3, pour l'indicateur d'effet de serre	384
Figure 166 : Comparaison de l'ACV de l'acier en fonction du contexte de fin de vie	386
Figure 167 : Tableau entrée-sortie, exemple simple (Source : Adapté de Damien Friot, EPFL)	424
Figure 168 : Approches Hybrides, Comparaison (Source : Suh 2004)	427
Figure 169 : Stations utilisées par RTE pour le calcul de la température nationale, source RTE	438
Figure 170 : Détermination du gradient	440
Figure 171: Coefficients de modulation de la consommation nationale d'électricité	442
Figure 172 : Coefficients de modulation de la consommation nationale sur les jours de la semaine	443
Figure 173 : Coefficients de modulation de la consommation nationale sur les mois de l'année	443
Figure 174 : Moyenne des maximums, des moyennes et des minimums des températures journalières, par mois, selon la RT2012 ou selon les données historiques de Météo-France, pour la station de Trappes.	445
Figure 175 : Minimum journalier de production hydraulique	448
Figure 176: Extraction de la partie variable de la production hydraulique.....	448
Figure 177 : Calcul du productible modulable hebdomadaire moyen	449
Figure 178 : Prise en compte du déphasage et lissage du productible hebdomadaire moyen	449
Figure 179 : Courbe d'usage pour l'hydraulique de lac.....	450
Figure 180 : Variation horaire de la production nucléaire en 2013 (en % de la capacité disponible) et variations maximale à la hausse (rouge) et à la baisse (vert) de production fixées dans le modèle.....	452
Figure 181 : Variation de la production d'hydraulique de lac en 2013 (en % de la capacité disponible) et variations maximales à la hausse (rouge) et à la baisse (vert) de production fixées dans le modèle.....	453
Figure 182 : Variation de la production de fossile (gaz et charbon) en 2013 (en % de la capacité disponible) et variations à la hausse et à la baisse (rouge) de production fixées dans le modèle pour le groupe fossile 1 (bleu) et 2 (rouge), correspondant respectivement au 90 et 10ème centile pour le groupe fossile 1 et aux 0,1% de valeur les plus basses et hautes pour le groupe fossile 2.	453
Figure 183 : Production nucléaire en 2013 exprimée en pourcentage de la demande résiduelle en électricité. La ligne rouge représente le dernier centile à 98,3 %.....	454
Figure 184 : Production hydraulique 2013 et borne minimale de production (en bleu)	454

Figure 185 : Production de pointe (fioul et turbine à combustion) 2013 (en bleu) et borne minimale de production fixée dans le modèle (trait rouge)	454
Figure 186 : Impacts environnementaux par kWh fourni au réseau BT, par technologie...	457
Figure 187 : Capture d'écran du logiciel Alcyone (http://www.izuba.fr/logiciel/alcyone)	458
Figure 188 : Exemple de résultats Pléiades+COMFIE, (http://www.izuba.fr/logiciel/pleiadescomfie)	459
Figure 189 : Validation de COMFIE, extrait de Recht et al. (Recht et al., 2014)	459
Figure 190 : Déroulement des calculs dans NovaEQUER, (B. Polster, 1995)	460
Figure 191 : Représentation schématique de l'approche « cut-off »	474
Figure 192: Représentation schématique de l'approche « end-of-life »	474
Figure 193 : Représentation schématique de l'approche « waste mining »	474
Figure 194: Représentation schématique de l'approche 50-50	474
Figure 195 : Principales énergies utilisées dans les réseaux de chaleur urbains en France (source : http://reseaux-chaleur.cerema.fr/wp-content/uploads/20150205-ENQUETE_2013_Rapport-final-2014.pdf)	479
Figure 196 : Impacts de la production de chaleur à base de combustibles fossiles, base ecoinvent v3	480
Figure 197 : Rapport ecoInvent 13-II Waste Incineration V2.1 (Doka, 2007)	482
Figure 198 : Parc roulant des véhicules particuliers 1970-2025 (milliards de km), Hugrel et Joumard (2004, p. 25)	494
Figure 199 : Caractérisation des ordures ménagères résiduelles, campagne MODECOM, Ademe 2007	496
Figure 200 : Synoptique du traitement des déchets, étude de cas, source : Julien Grimaud, Efficacity	498
Figure 201 : Consommation individuelle liée à la mobilité, par typologie	499
Figure 202 : Capacité et vitesse libre des nouveaux tronçons de la Cité Descartes, CDE (Vanhille, 2015)	500
Figure 203: Analyse de contribution par mode de transport, en considérant un mix électrique moyen pour les transports électriques	501
Figure 204 : Analyse de contribution par mode de transport, en considérant un mix électrique marginal pour les transports électriques	501

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principales caractéristiques de l'approche conséquentielle-projet par rapport à l'approche attributionnelle classique.....	29
Tableau 2 : Extrait de la grille d'objectifs, projet REGENER, dimension écologique	39
Tableau 3 : Liste des douze indicateurs adaptés à l'étude des bâtiments	39
Tableau 4 : Principales différences entre ACVA et ACVC, (tiré de Brander et al., 2008).....	49
Tableau 5 : Classification des produits et systèmes liés aux ensembles bâtis	59
Tableau 6 : Typologie des méthodes prospective, adapté de McDowall et Eames (2006)	74
Tableau 7 : Cartographie des évolutions prospectives, par phases et contributeurs	79
Tableau 8: Indicateurs de performance de la modélisation.....	95
Tableau 9: Données utilisées	96
Tableau 10 : Liste des indices et sous-indices temporels	96
Tableau 11: Température nationale: Coefficient de pondération par zone thermique.....	100
Tableau 12 : Capacités installées des technologies fatales	112
Tableau 13 : Valeurs mensuelles des productions maximales et des Capacités éoliennes installées 2012-2013	113
Tableau 14 : Part de la capacité éolienne installée dans chaque zone thermique, 2013.....	114
Tableau 15 : Modélisation Eolien : Identification des paramètres de la fonction de transfert	116
Tableau 16 : Part des capacités PV installées par zone RT et latitude des zones RT	121
Tableau 17 : Productions et capacités des différents types de centrale hydroélectrique en France	129
Tableau 18 : Production modulable : résultat de l'optimisation des paramètres restants	150
Tableau 19 : Validation du modèle de production modulable sur 2013.....	151
Tableau 20 : Validation du modèle de production modulable sur 2014.....	152
Tableau 21 : Mix marginal 2013 pour une demande constante entre 10 W et 1 MW	154
Tableau 22 : Mix marginal « type » pour 1 MW constant	155
Tableau 23 : Equilibre offre-demande généré par le modèle pour une année climatique « type »	157
Tableau 24 : Performance de la prévision de demande totale sur 2014	158
Tableau 25 : Erreurs sur la production nucléaire, charbon-gaz et pointe, pour l'année 2014.	163
Tableau 26 : Technologies de production d'électricité et abréviations	175
Tableau 27 : Liste des indicateurs environnementaux évalués	177

Tableau 28 : Variation des impacts par kWh fourni	187
Tableau 29 : Mix marginaux moyen sur l'année selon la méthode GHG-P	198
Tableau 30 : Approche attributionnelle dynamique et approche marginale dérivée	199
Tableau 31 : Composition des murs INCAS (Pannier, 2014)	207
Tableau 32 : Ponts thermiques linéiques considérés	209
Tableau 33 : Résultats de la STD	210
Tableau 34 : Résumé des différences méthodologiques entre les approches attributionnelle et conséquentielle.....	215
Tableau 35 : Comparaison des variantes constructives sur la base des cinq indicateurs dont la valeur normalisée en équivalent habitants-année est la plus élevée	221
Tableau 36 : Hypothèses principales selon l'approche utilisée	271
Tableau 37 : Comparaison entre le modèle de prévision développé au Chapitre 3 et le modèle MARKAL-TIMES sur l'évaluation de l'indicateur d'effet de serre par kWh d'électricité produit	276
Tableau 38 : Résultats de la STD	278
Tableau 39 : Besoins énergétiques en énergie finale pour les scénarios 1 et 2.....	279
Tableau 40 : Récapitulatif des données utilisées	301
Tableau 41 : Détermination de l'inventaire des émissions directes à partir de la base de données ecoinvent v3.2 et du modèle de transport	306
Tableau 42 : Correspondance entre le mode de transport et ecoinvent pour les TC	309
Tableau 43 : Rendement électrique et thermique sur PCI des unités d'incinération d'après chiffres ADEME et ITOM)	328
Tableau 44 : Pouvoir calorifique inférieur et supérieur des déchets.....	329
Tableau 45 : Composition des mix électriques moyen et marginal	331
Tableau 46 : Composition des déchets ménagers pour le cas d'étude illustratif, adapté du bilan ADEME 2007 sur la composition moyenne nationale des ordures ménagères	337
Tableau 47 : Impacts de la fourniture de chaleur par des chaudières collectives	338
Tableau 48 : Données programmatiques (tiré de Mailhac, 2015)	349
Tableau 49 : Composition des parois	350
Tableau 50 : Scénarios de ventilation et d'infiltrations	351
Tableau 51 : Besoins énergétiques calculés par STD	353
Tableau 52 : Émissions locales par kilomètre parcouru en véhicule particulier, évaluées par le modèle de simulation transport pour les 7 sous-zones correspondant au projet étudié	357
Tableau 53 : Indicateurs environnementaux évalués dans l'étude de cas.....	359

Tableau 54 : Tableau des correspondances	359
Tableau 55 : Scénarios de fin de vie pour les matériaux	360
Tableau 56 : Caractérisation des déchets générés annuellement par la Cité Descartes	363
Tableau 57 : Procédés ecoinvent considérés	364
Tableau 58 : Caractéristiques des espaces verts dans NovaEQUER.....	365
Tableau 59 : Paramètres à renseigner dans NovaEQUER.....	461
Tableau 60 : Fichier texte pour le paramétrage du modèle	464
Tableau 61 : Facteurs de normalisation	476
Tableau 62 : Impacts générés par la production d'un MJ de chaleur à partir de gaz ou de fioul (chaudière), base ecoinvent v3.....	477
Tableau 63 : Impacts évités en minimaux et maximaux en considérant le PCI du déchet et le combustible évité, base ecoinvent v3	478
Tableau 64 : Liste des 55 procédés d'incinération de déchets solide analysés, base ecoinvent v3.....	483
Tableau 65 : Mode de valorisation énergétique dans les unités de valorisation des ordures ménagères en France	484
Tableau 66 : Impacts environnementaux de l'incinération des déchets, selon le type de déchet incinéré, base ecoinvent v3.....	485
Tableau 67 : Impacts environnementaux générés par la production d'électricité en considérant un mix de production moyen ou un mix marginal, calcul de l'auteur à partir de la base ecoinvent v3.....	486
Tableau 68 : Bilan environnemental par kg de déchets incinéré avec récupération d'énergie en considérant le gaz comme combustible évité (pertes de distribution 12 %, rendement 53,9%), calcul de l'auteur à partir de la base ecoinvent v3.....	487
Tableau 69 : Bilan environnemental par kg de déchets incinéré en considérant le fioul comme combustible évité (pertes de distribution 12 %, rendement 53,9%), calcul de l'auteur à partir de la base ecoinvent v3.....	488
Tableau 70 : Bilan environnemental par kg de déchets incinéré en considérant qu'une production d'électricité moyenne par le réseau est évitée (6 % de pertes de distribution, rendement de 15,9 %), calcul de l'auteur à partir de la base ecoinvent v3	489
Tableau 71 : Bilan environnemental par kg de déchets incinéré en considérant qu'une production d'électricité marginale par le réseau est évitée (6 % de pertes de distribution, rendement de 15,9 %), calcul de l'auteur à partir de la base ecoinvent v3	490
Tableau 72 : Bilan environnemental par kg de déchets incinéré en considérant de la cogénération : production d'électricité marginale et chaleur fioul évitées (6 % de pertes de distribution pour l'électricité, rendement du turboalternateur de 11,4 % et chaleur, fioul, 12 %	

pertes de distribution, rendement chaudière de 27,9 %), calcul de l'auteur à partir de la base ecoinvent v3.....	491
Tableau 73: Bilan environnemental par kg de déchets incinéré en considérant de la cogénération : production d'électricité moyenne et chaleur gaz évitées (6 % de pertes de distribution pour l'électricité, rendement du turboalternateur de 14,4 % et chaleur, gaz, 12 % pertes de distribution, rendement chaudière de 70,9 %, calcul de l'auteur à partir de la base ecoinvent v3.....	492
Tableau 74: Caractérisation des ordures ménagères résiduelles et regroupement par catégories utilisées dans l'étude de cas	496
Tableau 75 : Quantitatif des flux de déchet par usage, type de déchet et filière de traitement	497
Tableau 76 : Résultats ACVC-P prospective (matériaux+énergie), par usager, par an en fonction des scénarios prospectifs	503
Tableau 77 : Résultats ACVA prospective (matériaux+énergie), par usager, par an en fonction des scénarios prospectifs	504

NOMENCLATURE

Notations latines

a_{nuik} : Paramètre déterminant la baisse de la disponibilité des centrales nucléaires en cas de températures extérieure élevée

C_{base} : Puissance appelée de base (Calcul de la consommation nationale)

C_{FR} : Consommation d'électricité nationale « type »

$c_{step,h,N}$: Consommation d'électricité des STEP à l'heure h de la période N

$C_{step,N}$: Vecteur des consommations horaires d'électricité des STEP sur la période N

C_{STEP} : Consommation d'électricité des STEP

CF : Vecteur des facteurs de caractérisation

$CF_{c,s}$: Facteur de caractérisation de l'impact c pour la substance s

D_i : Disponibilité de la technologie i (en MW)

d_m : Jour du mois (de 1 à 30 ou 31)

d_w : Jour de la semaine (de 1 à 7)

d_y : Jour de l'année (de 1 à 365)

E_i : Productible annuel de la technologie i

f_e : Vecteur des facteurs de charge horaire estimés pour une journée (24 valeurs), pour un jour à modéliser (résultat du modèle statistique)

F_r : Ensemble des f_r

f_r : Vecteur des facteurs de charge horaire réels pour une journée (24 valeurs), pour un jour historique (données réelles connues)

f_{r-th} : Vecteur des facteurs de charge horaire théorique pour une journée (24 valeurs), pour un jour historique (données calculées en fonction des vitesses de vent)

f_{th} : Vecteur des facteurs de charge horaire théoriques pour une journée (24 valeurs), pour un jour à modéliser (données « type », calculé en fonction des vitesses de vent)

F_w : Facteur de charge éolien

F_{w-fr} : Facteur de charge éolien nationale

f_{zone} : facteur de charge éolien d'une zone thermique

g : Gradient thermique (en $MW.C^{\circ -1}$)

g_e : Gradient thermique d'été (en $MW.C^{\circ -1}$)

g_h : Gradient thermique d'hiver (en $MW.C^{\circ -1}$)

G_h : Rayonnement global horizontal

G_{30} : Rayonnement global incliné à 30°

G_D : Rayonnement direct

G_{Dh} : Rayonnement direct horizontal

G_{DN} : Rayonnement direct Normal

G_{D30} : Rayonnement direct incliné à 30°

G_d : Rayonnement diffus

G_{dh} : Rayonnement diffus horizontal

G_{d30} : Rayonnement diffus incliné à 30°

G_r : Rayonnement réfléchi

G_{rh} : Rayonnement réfléchi horizontal

G_{r30} : Rayonnement réfléchi incliné à 30°

h : Heure

h_d : Heure du jour (de 1 à 24)

H_N : Nombre d'heures dans la période d'optimisation N

h_m : Heure du mois (en moyenne de 1 à 730)

h_w : Heure de la semaine (de 1 à 168)

h_y : Heure de l'année (de 1 à 8760)

ICV_i : Inventaire de flux de la technologie i

ICV_{net} : Inventaire de flux des infrastructures réseaux (électricité)

I_c : Impact c

I_i : Vecteur d'impact de la technologie i , pour 1 kWh délivré sur le réseau basse tension

K_i : Capacité installée de la technologie i (en MW)

k_d : Coefficient de disponibilité des centrales nucléaires

k_p : Coefficient de production des centrales nucléaires, produit de k_d et k_u

k_u : Coefficient d'utilisation des centrales nucléaires disponible

k_{u-max} : Coefficient d'utilisation maximum des centrales nucléaires disponible

k_{max} : Pourcentage maximum de la demande que peut couvrir le production nucléaire

Lac_N : Productible total de l'hydraulique modulable sur la période N

Lac_{tot} : Productible total de l'hydraulique modulable sur une année

l_1, l_2 : Hauteur à laquelle est mesurée la vitesse du vent

l_i : Pertes en ligne pour la technologie i (électricité)
 lb_i : Borne minimum de production de la technologie i
 N : Période d'optimisation
 P_i : Production d'électricité de la technologie i
 $p_{i,h,N}$: Production d'électricité de la technologie i à l'heure h de la période N
 $P_{i,N}$: Vecteur des productions horaires d'électricité de la technologie i sur la période N
 PLE : Production Locale d'Energie
 PLE_{Exp} : Production Locale d'Energie Exportée
 $PV\%$: Facteur de charge photovoltaïque
 q_s : Quantité de substance s
 Res_h : Demande résiduelle en électricité (MW) à l'heure h
 Res_N : Vecteur des demandes résiduelles horaires à satisfaire (MW)
 R_{PV} : Facteur de proportionnalité entre le rayonnement global à 30° et le facteur de charge photovoltaïque
 S_{init} : vitesse de vent seuil de mise en rotation de l'éolienne
 $S_{100\%}$: vitesse de vent à partir de laquelle l'éolienne fonctionne à puissance maximale
 S_{max} : vitesse de vent à partir de laquelle l'éolienne s'arrête (arrêt de sécurité)
 T_{nat} : Températures moyenne nationale
 $\overline{(T_{nat})}$: Moyenne journalière de la température nationale
 T_{seuil} : Températures seuil à partir de laquelle la consommation nationale devient thermosensible
 $T_{seuil-été}$: Températures seuil en été
 $T_{seuil-hiver}$: Températures seuil en hiver
 U_h : Courbe d'usage du productible hydraulique modulable
 ub_i : Borne maximum de production de la technologie i
 V_1, V_2 : Vitesse de vent pour une altitude 1 ou 2
 v_i : Coût de la technologie j
 Var_j : Variation maximum de la technologie j , en MW
 z_{zone} : Part de la capacité éolienne installée dans une zone thermique

Abréviations

ACV : Analyse du cycle de vie

ACVA : Analyse du cycle de vie attributionnelle

ACVC : Analyse du cycle de vie conséquentielle

ACVC-P : Analyse du cycle de vie conséquentielle-Projet

ADP: Epuisement des ressources abiotiques (Abiotic Depletion Potential)

AP : Potentiel d'acidification (Acidification Potential)

BD : Dommages à la biodiversité (Biodiversity Damage)

CED : Energie primaire ou demande cumulative d'énergie (Cumulative Energy Demand)

COR : Coefficient de corrélation

EP : Potentiel d'eutrophisation (Eutrophication Potential)

F_CogéFioul : Production d'électricité par cogénération fioul

F_CogéGaz : Production d'électricité par cogénération gaz

F_EntTh : Production d'électricité provenant d'énergies renouvelables et de récupérations thermiques (IUOM/biomasse/biogaz)

F_Eolien : Production d'électricité éolienne

F_HydroFil : Production d'électricité par centrales hydrauliques au fil de l'eau

F_Inconnue : Production d'électricité d'origine méconnue, suppose provenir de gaz industriels

F_Solaire : Production d'électricité d'origine photovoltaïque

GWP100 : Potentiel de réchauffement global, ou effet de serre ou contribution au changement climatique (Global Warming Potential)

HD : Dommages à la santé humaine (Health Damage)

IBB : Maison INCA Béton banché

IDM : Maison INCA double mur

IMA : Maison INCA en briques monomur

IOB : Maison INCA à ossature bois

M_FioulTAC : Production d'électricité à partir de centrales de pointe : fioul et turbine à combustion

M_GazCharbon : Production d'électricité à partir de centrales thermiques centralisées gas (CCG) et charbon

M_Hydrolac : Production d'électricité d'hydraulique de lac

M_Import : Importation d'électricité

M_Nucléaire : Production d'électricité d'origine nucléaire

M_STEP: Production d'électricité provenant du turbinage des STEP

MBE : « Mean Biased Error » Biais

MAE : « Mean Absolute Error », Erreur absolue moyenne, Moyenne des valeurs absolues des erreurs

MAPE : « Mean Absolute Percentage Error », Erreur moyenne absolue relative, Moyenne des valeurs absolues des erreurs relative (écart divisé par la valeur de référence)

NRW : Génération de déchets non radioactifs (Non-radioactive waste)

O : Génération d'odeur (Odor)

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur

PE : Polyéthylène

PET : Poly téréphtalate d'éthylène

POP : Potentiel de création d'ozone photochimique, ou smog (Photochemical ozone potential)

PP : Polypropylène

PS : Polystyrène

PVC : Polychlorure de vinyle

RSME : « Root Squared Mean Error » : Erreur quadratique moyenne

RT2012 : Réglementation thermique 2012

RTE : Réseau de Transport et d'électricité, Gestionnaire du réseau électrique de transport (haute tension)

RW : Génération de déchets radioactifs (Radioactive waste)

SER : Syndicat des Énergies Renouvelable

STEP : Station de Transfert d'Énergie par Pompage

TIC : Technologies de l'Information et de la Communication

W : Consommation d'eau (Water)

Lettres grecques

α : Coefficient mensuel de modulation de C_{base}

β : Coefficient journalier (sur les jours de la semaine) de modulation de C_{base}

γ : Coefficient horaire de modulation de C_{base}

δ : Déclinaison du soleil

ΔT : Écart à la température seuil (d'hiver ou d'été), en °C (est égal à $|\overline{T_{nat}} - T_{seuil}|$)

φ : Latitude

ρ : Albédo

ν : Rugosité du terrain (calcul de la production éolienne)

ω : Angle horaire

Indices

d : Jour

i : Technologie i

h : Valeur de la variable à l'heure h

m : Mois (de 1 à 12)

s : Saison (de 1 à 4)

w : Semaine (de 1 à 52)

EXECUTIVE SUMMARY

The general objective of this work is to improve accuracy and representativeness of environmental assessment of building and district project designs.

Environmental impacts induced by urban projects are significant and concern various topics (resources, health, biodiversity). In the French context, buildings account for 40 % of the energy consumption (and 60 % of electricity). It emits around a quarter of national greenhouse gases, represents three-quarter of the waste volume (even if the majority is inert). 600 km² of natural land disappear each year because of urban sprawl. Buildings are also important consumers of potable water, emitters of particulate matters (15 %) and non-methane volatile organic compounds (10 %). A large part of life-cycle impacts is indirect (for instance radioactive waste generated by electricity consumption).

This calls for a holistic and multicriteria approach such as Life-Cycle-Analysis (LCA) in order to evaluate environmental performance of construction or retrofitting projects. Considering cradle to grave impacts this method is used at different project phases: planning, design aid, management strategies, retrofitting, dismantling, and waste management.

The thesis lies in the framework of life-cycle analysis applied to urban project design, from individual houses up to multifunctional neighborhoods. The underlying objective is to improve relevance and accuracy of the decision aid provided by LCA-based design tools.

Three interacting topics have been investigated:

- Consequential assessment: How can the results of current research on consequential LCA be implemented in Building LCA?
- Dynamic: How to integrate dynamic interaction between buildings and the background system, mainly the electricity grid?
- Prospective: How to take into account the long life span of buildings and urban districts?

The dissertation firstly suggests a new framework for evaluating construction or retrofitting projects, grounded in consequential LCA (Chapter 1). This application of consequential LCA could be seen as a paradigm change: it is not anymore the building or district that is evaluated but "the decision" to built (or rehabilitate) the building or district. The practical implementation of this new approach is mainly based on the determination of marginal technologies and on the use of system expansion instead of allocations (Table 1).

The new approach is named consequential-project. It neglects market effects such as elasticities, rebound effects, experience curves. These effects are generally related to consequential LCA but are considered to be appropriate when evaluating public policies implementation or a whole economic sector evolution but not considering a specific and unique urban project.

Main characteristic of the consequential-project approach compared to a traditional attributional approach

Modelling hypothesis	Attributional	Consequential-project
Materials production	Average technologies	Marginal technologies
Biogenic carbon	Neutral balance	Differentiated balance
Use of recycled materials	Cut-off approach	Depending on market constraint
End-Of Life recycling	Cut-off Approach	Depending on market constraint
Joint production	allocations	Substitution and system expansion
System model for the background database	<i>cut-off</i>	<i>Allocation at the Point Of Substitution (APOS)</i>

The practical application of this consequential-project approach requires knowledge generation on dynamic and prospective LCA. In the Chapter 2, a dynamic model of the electricity system is suggested. From this model, a reference operation year of the electricity system has been defined, mitigating climatic and economical hazards of real years. The model is calibrated on French data (typical meteorological years, actual installed capacities, plants efficiencies) but could be adapted to other national contexts. Based on this model, a dynamic average approach and a marginal approach are suggested to assess life-cycle impacts of electricity consumption (Chapter 3). These developments improve the accuracy of LCA independently of the chosen modeling approach (consequential or attributional) and related study objectives.

The prospective dimension is then explored in the Chapter 4, through scenarios development. The suggested scenarios bring together national energy prospective research and global warming effects on buildings thermal behavior. The combined effects are evaluated using a novel and integrated approach. The project environmental evaluation in various possible futures context improves the robustness of the study results. Moreover, the respect of the functional unit (including comfort constraints) is ensured. Energy consumption is thus more consistently evaluated: possible evolutions due to climate change are accounted for (e.g increase due to cooling demand, decrease due to heating demand). Background evolution is partially taken into account, mainly through the electricity system evolution. This prospective approach is developed in a differentiated way for both attributional and consequential LCA.

The thesis then addresses the scale issue when moving from building to district projects (Chapter 5). Following the consequential-project approach principles, the focus is made on integrating daily transport and domestic waste models in LCA of urban projects. A method to combine local transport simulation models and building LCA is suggested. It establishes a first step towards integrated multidisciplinary assessment of urban projects.

The developed approaches and methodologies are finally tested on a case study, a multifunctional neighborhood districts located in Marne-La-Vallée (Paris surroundings) (Chapter 6). It is composed of 25 buildings (residential areas, offices and shops).

Research perspectives are plenty and are described at the end of the thesis. They mainly concern the development of integrated ecodesign approach, expansion up to the city level and improvement of prospective assessment.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'objectif général de ces travaux de thèse est d'améliorer la précision et le réalisme de l'évaluation environnementale des bâtiments et des quartiers en particulier en phase de conception.

Le parc bâti est une brique élémentaire de notre société. Il conditionne une partie de notre comportement sociétal lié à l'urbanisme : transports pendulaires, type de services accessibles. Il accueille nos activités professionnelles, personnelles, nos loisirs. Sa contribution à plusieurs enjeux environnementaux est cruciale en France et dans le monde. Dans le contexte français, près de 40 % de la consommation énergétique (et 60 % de l'électricité) sont attribués à ce parc vieillissant. Il est responsable de l'émission d'un quart environ des gaz à effet de serre nationaux (ADEME, 2012). Le secteur du BTP génère près des trois quarts du volume national de déchets (même si l'écrasante majorité est inerte) et engloutit 600 km² par an d'espaces naturels^{1,2}. Il est l'un des principaux consommateurs d'eau, derrière l'agriculture. On peut encore citer de façon non exhaustive sa participation à 15 % des émissions de particules, 10 % des émissions de composés organiques non méthaniques (peintures principalement) et la pollution de l'eau liée aux activités de terrassement, selon les chiffres donnés par le ministère de l'environnement³.

Le caractère indirect de plusieurs impacts liés au bâtiment (déchets radioactifs générés par la consommation d'électricité par exemple) ainsi que sa participation à un grand nombre de phénomènes appelle l'utilisation d'une méthode d'évaluation environnementale holistique et multicritère. C'est le cas de l'analyse de cycle de vie (ACV), qui considère la participation d'un bâtiment ou d'un quartier à un ensemble cohérent de thématiques environnementales (au contraire d'un outil monocritère comme le bilan carbone) et ce sur l'intégralité de son cycle de vie : fabrication des matériaux, construction, utilisation, rénovation, démolition (Jeroen Guinee, 2002). Cette méthode peut être utilisée à différents niveaux pour l'étude des bâtiments et des quartiers : définition d'objectifs de programme, aide à la conception, aide à la gestion, aide à la rénovation, aide à la stratégie de déconstruction. Elle est utilisée en France depuis les années 1990 sur les bâtiments (B. Polster, 1995) et plus récemment sur les quartiers (Popovici, 2005).

Cette thèse s'intègre dans le cadre de l'application de l'ACV à l'écoconception des ensembles bâtis, de la maison individuelle jusqu'au quartier multifonctionnel. On cherche à améliorer la qualité de l'aide à la décision fournie par les outils d'écoconception en renforçant le réalisme et la précision des études.

Trois axes de travail intercorrélés ont été explorés :

- Conséquentiel : Quels apports conceptuels et pratiques peut-on utiliser en provenance des recherches sur l'ACV conséquentielle ?

¹ www.developpement-durable.gouv.fr/Etalement-urbain-et.html

² www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/326/1097/dechets-secteur-construction.html

³ www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/326/1097/rejets-polluants-lair.html

- Dynamique : Comment intégrer les interactions dynamiques entre le parc bâti et son système d'arrière-plan, en particulier le système électrique?
- Prospectif : Comment tenir compte de la longue durée de vie des ensembles bâtis?

La thèse propose premièrement un nouveau cadre conceptuel pour l'évaluation des projets de conception et de réhabilitation s'inspirant des récents travaux méthodologiques sur l'ACV conséquentielle (Chapitre 1). Cette application de la philosophie « conséquentielle » est un changement de paradigme qui déplace l'objectif de l'étude : ce n'est pas « le bâtiment/quartier » qui est évalué mais « la décision de réaliser ou de rénover ce bâtiment/quartier ». La mise en pratique de cette nouvelle approche s'appuie sur la détermination des technologies marginales de production et sur l'expansion du système intégrant les effets de substitution et les impacts évités (voir Tableau 1). L'approche « conséquentielle-projet » proposée justifie de négliger les effets de marché (utilisation de modèles d'équilibre économique, effets rebonds, élasticités, courbe d'expérience) généralement associés aux études conséquentielles. L'analyse de ces effets est plus adaptée à l'étude d'un secteur économique qu'à l'étude d'un projet.

Tableau 1 : Principales caractéristiques de l'approche conséquentielle-projet par rapport à l'approche attributionnelle classique

Hypothèses de modélisation	Attributionnelle	Conséquentielle-Projet
Fabrication des matériaux/procédés	Technologie(s) moyenne(s)	Technologie(s) marginale(s)
Carbone biogénique	Bilan neutre	Bilan différencié
Utilisation de matériaux recyclés – bénéfice intégré–	Méthode des stocks 100 %	Prise en compte des contraintes de marché : 0 ou 100 %
Recyclage/valorisation en fin de vie des matériaux – bénéfice intégré–	Méthode des stocks 0 %	Prise en compte des contraintes de marché : 0 ou 100 %
Export d'énergie/ Coproduction	Méthode des coproduits : allocation des infrastructures de production	Méthode des impacts évités : Substitution des technologies marginales
Système de modélisation de la base de données pour l'arrière-plan	<i>cut-off</i>	<i>Allocation at the Point Of Substitution (APOS)</i>

L'application pratique de cette nouvelle approche « conséquentielle-projet » nécessite la production de connaissances mobilisant l'ACV dynamique et l'ACV prospective. Concrètement, la thèse propose une modélisation dynamique du fonctionnement du système électrique dans un cadre « type » affranchi des aléas climatiques et économiques (Chapitre 2). Le modèle représente la situation actuelle française (par exemple données météorologiques types françaises, capacités installées, caractéristiques des centrales) mais peut être calibré pour d'autres contextes nationaux. Il sert de base au développement de méthodes d'évaluation originales des impacts de l'électricité : une méthode dynamique

moyenne et une méthode marginale (Chapitre 3). Ces méthodes améliorent la précision d'une étude d'analyse de cycle de vie, quel que soit l'objectif (certification ou écoconception) et l'approche méthodologique associée (attributionnelle ou conséquentielle-projet).

La thèse propose ensuite l'intégration de scénarios prospectifs adaptés à l'étude des bâtiments et des quartiers (Chapitre 4). Celle-ci associe les recherches en prospective énergétique menées à l'échelle nationale et les recherches concernant l'impact du changement climatique sur le comportement thermique des bâtiments. Les effets conjoints de ces deux déterminants sont évalués au sein d'une approche originale et intégrée. L'évaluation environnementale du projet dans différentes situations futures possibles améliore la robustesse de l'étude. Le respect de l'unité fonctionnelle sur l'ensemble du cycle de vie (par exemple confort de l'occupant en climat futur) est assuré. La consommation énergétique est évaluée de façon plus complète en intégrant une possible modification des consommations énergétiques due aux changements climatiques (par exemple consommation de climatisation supplémentaire, baisse de consommation de chauffage). L'évolution du système d'arrière-plan est partiellement prise en compte, principalement à travers l'évolution du système électrique. La mise en place de scénarios prospectifs est proposée de façon différenciée pour une approche attributionnelle et une approche conséquentielle.

Le Chapitre 5 est axé sur la modélisation du système urbain et la question du changement d'échelle du bâtiment vers le quartier. Les cas du transport des occupants et du traitement des déchets sont analysés au prisme de l'approche « conséquentielle-projet » ébauchée au Chapitre 1. Une méthodologie de couplage des outils de simulation transport au niveau local et de l'ACV est notamment proposée. Elle constitue un premier pas vers un couplage transdisciplinaire des outils d'analyse des projets urbains.

Dans le Chapitre 6, les différents développements méthodologiques sont finalement appliqués à une étude de cas correspondant à un projet d'aménagement concernant 25 bâtiments (logements, bureaux, commerces) afin d'analyser et d'interpréter l'effet des nouvelles approches sur l'aide à la décision fournie par les outils d'écoconception.

Les perspectives de recherche de ce travail sont nombreuses et sont détaillées en conclusion de cette thèse. Elles portent principalement sur le développement de démarches d'écoconception intégrées bâtiment-transport-biodiversité, sur l'extension de l'échelle d'étude en passant du quartier à la ville voire au territoire et les enjeux de la modélisation prospective.

Chapitre 1. État de l'art et positionnement du sujet de thèse

1.1. ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES BÂTIMENTS ET DES QUARTIERS

1.1.1. Introduction

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode développée dans les années 1970 pour évaluer les impacts environnementaux des produits manufacturés. Elle intègre toutes les étapes du cycle de vie du système étudié (produit ou service) depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement en fin de vie. L'objectif est d'éviter un déplacement de pollution d'une étape à l'autre du cycle de vie. Son caractère multicritère (prise en compte d'un large ensemble d'indicateurs environnementaux) vise à éviter également le déplacement d'un problème environnemental vers un autre.

La méthode d'ACV a été standardisée dans les années 90 (norme ISO 14040 et maintenant ISO 26 000, voir Figure 1). Après avoir défini les frontières du système étudié en fonction des objectifs et du champ de l'étude, il s'agit de faire l'inventaire des substances émises et puisées dans l'environnement tout au long du cycle de vie, puis d'évaluer les impacts sous la forme d'indicateurs environnementaux.

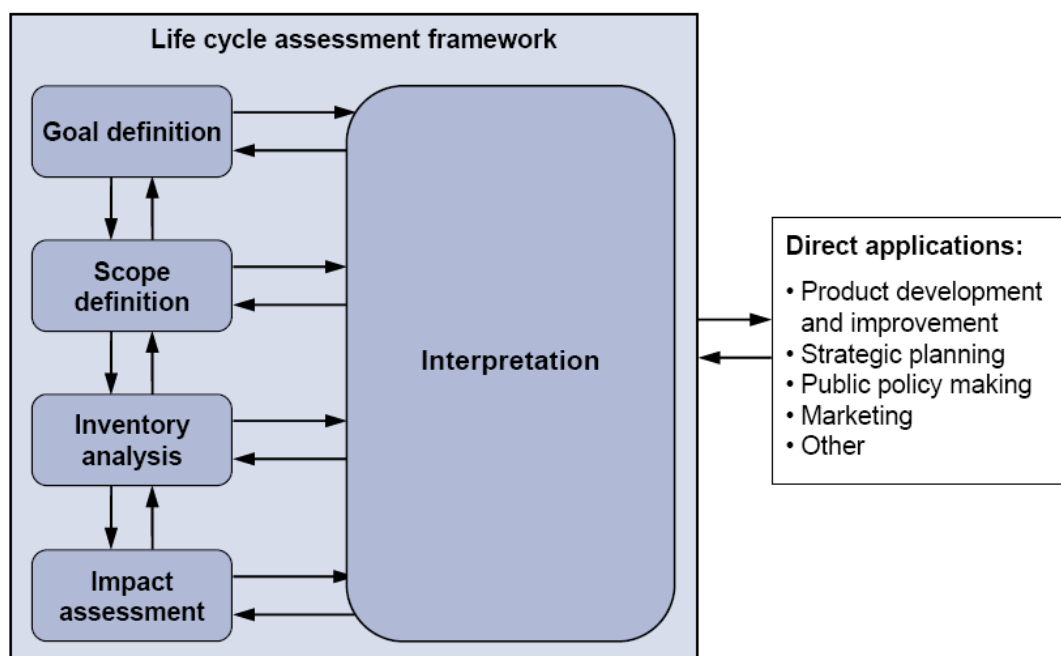


Figure 1 : Méthodologie de l'ACV, ILCD Handbook, adapté de ISO 14040 : 2006

Aujourd'hui, de nouvelles méthodes ou approches se développent avec pour lien la notion centrale de cycle de vie. Elles permettent d'améliorer la précision de l'inventaire en tenant compte de phénomènes dynamiques (DLCA, *Dynamic Life Cycle Assessment*), de secteurs économiques habituellement négligés (EIO-LCA, *Environmental Input-Output Based LCA*), d'étendre la méthode au domaine économique (LCC, *Life-Cycle cost*) ou social (SLCA

Social Life Cycle Assessment), etc. Ces nouveaux développements visent à combler les lacunes et limitations actuelles de l'ACV (Finnveden et al., 2009 ; Guinée et al., 2010 ; Reap et al., 2008).

En parallèle de ces développements, les études ACV sont généralement classées en deux grandes familles dans la littérature scientifique : l'approche « attributionnelle » (ACVA) et l'approche « conséquentielle » (ACVC) qui permettent de répondre à différents objectifs (Halvgaard et al., 2012). L'approche attributionnelle cherche à allouer une part de responsabilité à un système donné alors que l'approche conséquentielle cherche à modéliser les conséquences environnementales d'une décision.

Les objectifs de cette thèse sont d'étudier l'application de l'approche conséquentielle à l'analyse de cycle de vie des bâtiments et des quartiers, en particulier pour répondre à un objectif d'écoconception.

Dans ce premier chapitre, le cadre général de l'ACV est d'abord décrit, suivi de précisions concernant l'application de cette méthode à l'écoconception des bâtiments et des quartiers (particularités et indicateurs utilisés). L'analyse de cycle de vie conséquentielle et les méthodes qui lui sont associées sont ensuite présentées plus en détail. L'étude des connaissances existantes permet de définir les lacunes à combler afin de pouvoir appliquer cette méthode aux bâtiments et aux quartiers.

1.1.2. Cadre général de l'ACV

La démarche à suivre pour effectuer une analyse de cycle de vie d'un produit ou d'un service comprend quatre phases : définition et périmètre de l'étude, inventaire des flux entrants et sortants, évaluation des impacts environnementaux, interprétation, le tout dans une démarche itérative d'amélioration continue (Chomkhamsri et al., 2011).

Définir précisément l'objectif de l'étude et les questions auxquelles on cherche à répondre est une première étape fondamentale. De là découleront les choix méthodologiques appliqués par la suite. Dès cette étape, la distinction entre ACVA et ACVC semble apparaître. Selon que l'objectif est tourné a) vers un état des lieux, concernant un produit ou une technologie ou b) vers un développement, un changement concernant un produit ou une technologie, on va préférentiellement se diriger vers une approche de modélisation différente : « attributionnelle » dans le premier cas, « conséquentielle » dans l'autre.

L'objectif de l'étude définit la nature attributionnelle ou conséquentielle de l'étude ce qui orientera les choix méthodologiques.

La détermination du périmètre de l'étude comprend ensuite le choix d'une unité fonctionnelle et la définition des frontières du système. Ces choix découlent des objectifs de l'étude. L'unité fonctionnelle caractérise le système étudié en lui associant une unité, une fonction principale (son utilité) parfois assortie d'une ou plusieurs fonctions secondaires. Elle correspond à une base de comparaison permettant d'évaluer plusieurs variantes

équivalentes. Une unité de référence est définie, par exemple un bâtiment, ou un quartier, des fonctions qui lui sont associées (logements, services, confort...). Les hypothèses de bases (durée de vie, situation géographique...) sont ensuite posées, suivies des limites de l'étude (validité géographique, temporelle, incertitudes). Un choix est effectué parmi les nombreux indicateurs d'impact disponibles. Il est également important d'évaluer l'effort de collecte de données nécessaire et de caractériser l'audience cible.

Une fois le cadre d'étude défini, l'ensemble des émissions et des ressources émises ou consommées par le système étudié au cours de son cycle de vie est inventorié. L'inventaire doit être le plus exhaustif possible. Il est construit de manière itérative en fonction des données collectées. Il couvre le système étudié « du berceau à la tombe », soit de l'extraction des matières premières nécessaires à la réalisation du système étudié jusqu'à sa prise en charge en fin de vie (mise au rebut, recyclage, etc.).

Chacune des substances entrantes et sortantes évaluées sur l'ensemble du cycle de vie est affectée à différentes thématiques environnementales. Les différentes substances répertoriées sont agrégées sous forme d'indicateurs environnementaux durant l'étape de caractérisation, qui lie une substance et sa contribution à une problématique environnementale. Suivant les objectifs et le public cible, une représentation en impacts potentiels ou dommages est possible, et on interprète les résultats par rapport à la question posée. Chaque choix (sélection des catégories d'impacts, méthode de caractérisation, classification) doit être justifié.

Une attention particulière doit être portée sur la question des incertitudes et des limitations de l'étude. L'analyste doit, avant toute communication de ses résultats, évaluer la complétude de ses données ainsi que la sensibilité de ses résultats par rapport aux hypothèses choisies. Si la robustesse de l'étude n'est pas satisfaisante, cela peut donner lieu à une remise en question des hypothèses retenues pour la modélisation puis à une nouvelle itération de la phase d'inventaire.

La gestion des incertitudes et la robustesse des résultats est un enjeu majeur en ACV de manière générale. Elle est cruciale dans le contexte actuel où la méthode se démocratise et devient un outil de plus en plus utilisé pour l'élaboration de politiques publiques et la prise de décision (Williams et al., 2009). Une revue critique des difficultés liées à cette phase d'interprétation, notamment concernant la gestion des incertitudes, est présentée dans les travaux de Reap et al. (2008).

1.1.3. Particularités des ensembles bâtis

Bien qu'initialement appliquée à des produits industriels, la méthode ACV est aujourd'hui de plus en plus répandue dans le secteur de la construction (Chevalier, 2009). Elle peut être utilisée pour différents objectifs : en aide à la conception, aide à la rénovation, aide à la gestion, certification (Malmqvist et al., 2011 ; Erlandsson et Borg, 2003 ; Zabalza Bribián et al., 2009). Des projets européens comme REGENER se sont attachés à définir une méthodologie spécifique pour prendre en compte les particularités de ce secteur (Peuportier, 2001).

En Europe, un rapport de la SETAC⁴ de 2003 fait référence concernant l'application particulière de la méthode ACV au secteur du bâtiment (Kotaji et al., 2003).

Les particularités suivantes ont notamment nécessité une adaptation de la méthode :

- Contrairement à un produit fabriqué en série, le bâtiment est en général un produit unique, multifonctionnel, en interaction forte avec son environnement (Peuportier, 2003 ; Chevalier, 2009).
- L'importance de la consommation d'énergie en phase d'utilisation dans le bilan global d'un bâtiment oblige à évaluer ce paramètre avec une grande précision, en utilisant par exemple les outils de simulation thermique dynamique (Peuportier, 1998).
- L'usage du bâtiment et le comportement des occupants sont également des facteurs critiques qui impactent de façon importante le bilan environnemental (Polster et al., 1996a).
- La particularité des matériaux de construction utilisés peut ne pas être parfaitement représentée par des données génériques globales. L'enrichissement des bases de données par l'intégration de données spécifiques précises affinerait les études actuellement effectuées (Peuportier et al., 2011), d'autant que, si aujourd'hui les matériaux représentent encore une part assez faible des impacts finaux, celle-ci est amenée à augmenter avec la généralisation de la construction de maisons passives, voir à « énergie positive» (Blengini et Di Carlo, 2010).
- Sa durée de vie très longue implique de fortes incertitudes sur les hypothèses de fin de vie et l'évolution du système d'arrière-plan (production d'électricité, filières de recyclage, etc.).

En France, après une première adaptation de la méthode pour l'évaluation des bâtiments tournée vers l'aide à la conception dans les années 1990 (Polster, 1995), l'ACV a ensuite été étendue à l'étude des quartiers (Popovici, 2005). Peu d'outils appliquant l'ACV aux projets urbains sont aujourd'hui disponibles ; outre le travail de Popovici, on peut citer les travaux de Robinson et al. (2009) et Yépez-Salmon (2013).

Une revue critique publiée en 2015 n'a recensé que 14 articles scientifiques présentant des études d'ACV quartier (Lotteau et al., 2015). Quatre articles parmi les quatorze ont exclu la phase de fin de vie. Deux articles ne considéraient que l'énergie primaire comme indicateur et trois autres évaluaient seulement l'énergie primaire et le changement climatique. Les auteurs de l'étude recommandent notamment :

- De définir précisément les caractéristiques essentielles du quartier étudié (nombre d'habitants, nombre d'utilisateurs non résidents, taille de la parcelle, emprise au sol et durée d'analyse).
- D'intégrer à l'étude l'influence de l'espace urbain environnant sur la consommation d'énergie (morphologie urbaine, présence de végétation, choix des matériaux de surface).

⁴ Society of Environmental Toxicology And Chemistry

- D'intégrer systématiquement des études d'incertitudes liées à l'évolution sur le long terme de paramètres clés.
- De tenir compte de la variation temporelle de la production d'électricité.
- D'intégrer des indicateurs relatifs à l'usage des sols, à la qualité de l'air et aux ressources abiotiques non fossiles.

La performance environnementale d'un quartier n'est pas seulement l'addition de la performance des bâtiments et réseaux qui le composent. Les bâtiments interagissent entre eux (p. ex. effet de masques⁵), certains équipements peuvent être mutualisés (p. ex. réseau de chaleur urbain), les bâtiments interagissent également avec les réseaux énergétiques (p. ex. export d'électricité), les réseaux de transports (p. ex. stationnement), la gestion des déchets (p. ex. valorisation énergétique des déchets), la gestion de l'eau (p. ex. récupération de l'eau de pluie). Ceci implique le développement de modélisations intégrées et multi-échelles (Peuportier, Vorger, and Herfray 2012; Colombert et al. 2011).

1.1.4. Choix des Indicateurs environnementaux adaptés à l'étude des ensembles bâtis

1.1.4.1. OBJECTIFS ET INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX

Le choix des indicateurs environnementaux à étudier dans une étude ACV est une étape importante. Les indicateurs choisis doivent représenter l'ensemble des atteintes portées par le système étudié sur son environnement ainsi que les gisements d'amélioration ; leur coté pluriel est donc indispensable. Le public cible de l'étude est également un paramètre influençant le choix des indicateurs.

Les flux de l'inventaire sont associés à une ou plusieurs thématiques environnementales. La quantification du flux à l'indicateur est faite au moyen de facteurs de caractérisation. L'impact de l'ensemble des substances pour un indicateur s'exprime sous la forme :

$$I_c = \sum_{s=1}^n q_s \times CF_{c,s} \quad 1-1$$

où I_c est l'impact correspondant à la catégorie d'impact c résultant de l'émission de n substances au long d'un cycle de vie. q_s est la quantité de substance s inventoriée pour l'ensemble du cycle de vie. $CF_{c,s}$ est le facteur de caractérisation de l'impact c pour la substance s . Il peut être adimensionnel.

L'analyste peut s'appuyer sur des méthodes déjà utilisées dans la communauté ACV comme CML (Jeroen Guinee, 2002), Eco-indicator (Goedkoop et Spriensma, 2001), ReCiPe (Goedkoop et al., 2009), ou encore Impact2002+ (Jolliet et al., 2003). Il existe également des normes (p. ex.

⁵ Les effets de masque sont définis comme l'ensemble des obstructions au rayonnement solaire dans l'environnement proche (autres bâtiments, arbres, etc.) ou lointain (montagnes, etc.) affectant un bâtiment ou un ensemble de bâtiment.

européenne EN15978, ou française NF P01-010), des guides de bonnes pratiques sectoriels, REGENER (Peuportier et al., 1997), ou généralistes, ILCD Handbook (Chomkham Sri et al., 2011).

La diversité des choix possibles oblige l'analyste à prendre une décision argumentée et dûment justifiée. Le projet européen REGENER cité précédemment a permis de définir une grille d'objectifs auxquels devaient répondre les indicateurs environnementaux pour l'étude des bâtiments. Celle-ci est présentée dans le Tableau 2 pour le volet écologique.

Tableau 2 : Extrait de la grille d'objectifs, projet REGENER, dimension écologique

Dimensions	Buts	Objectifs
1 Écologique	1 Préserver les ressources	1 Préserver les matières premières 2 Économiser l'énergie 3 Économiser l'eau 4 Maîtriser l'usage du sol
	2 Protéger les écosystèmes	1 Limiter les émissions toxiques 2 Protéger le climat 3 Protéger la faune et la flore 4 Protéger les rivières et les lacs 5 Améliorer la qualité de l'air extérieur 6 Réduire les déchets 7 Réduire les déchets radioactifs 8 Préserver la couche d'ozone (9 Limiter les risques liés aux inondations)

En fonction de ces objectifs, douze indicateurs adaptés à l'étude des bâtiments ont été retenus. Ils ont été mis à jour une première fois dans le cadre d'un autre projet européen, PRESCO. Ces indicateurs sont majoritairement issus des méthodes CML (Jeroen Guinee, 2002) et Eco-indicator (Goedkoop et Spruiensma, 2001). Ils sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Liste des douze indicateurs adaptés à l'étude des bâtiments

Indicateur environnemental	Unité	Référence
Demande cumulative d'énergie	GJ [PCS]	(Frischknecht et al., 2007)
Eau utilisée	m ³	(Frischknecht et al., 2007)
Épuisement des ressources abiotiques	kg Sb éq.	(Jeroen Guinee, 2002)
Déchets produits	t	(Frischknecht et al., 2007)
Déchets radioactifs	dm ³	(Frischknecht et al., 2007)
Augmentation de l'effet de serre (100 ans)	t CO ₂ éq.	(Solomon, 2007)
Acidification	kg SO ₂ éq.	(Jeroen Guinee, 2002)
Eutrophisation	kgPO ₄ ³⁻ éq.	(Jeroen Guinee, 2002)
Domages à la biodiversité	PDF m ² an	(Goedkoop et Spruiensma, 2001)

Dommages à la santé	DALY	(Goedkoop et Spriensma, 2001)
Production d'ozone photochimique	kg C ₂ H ₄ éq.	(Jeroen Guinee, 2002)
Odeur	m ³ air	(Jeroen Guinee, 2002)

On peut voir que, par rapport à la grille d'objectifs, aucun indicateur ne concerne la couche d'ozone. En effet, suite à l'application du protocole de Montréal, entré en vigueur en 1989, les principales substances causant l'appauvrissement de la couche d'ozone ont été bannies dans de nombreux pays, dont la France. Les indicateurs présentés sont aujourd'hui utilisés dans le logiciel EQUER, par exemple (Peuportier et al., 2013).

Sur les douze indicateurs, dix sont des indicateurs orientés problèmes, ou « indicateur *midpoint* » et deux sont des indicateurs orientés dommages, ou « indicateur *endpoint* ». La différence entre ces deux catégories d'indicateur vient de leur position sur la chaîne de conséquence d'une intervention (consommation de ressources, émissions d'un flux). Les indicateurs orientés problème interviennent tôt dans la chaîne (illustré sur la Figure 2 pour la méthode ReCiPe). Ils caractérisent un risque potentiel. Ils sont ainsi plus robustes mais souvent plus difficiles à interpréter (kg phosphate équivalent, kg CO₂ équivalent). Au contraire, les indicateurs orientés dommage sont évalués au bout de la chaîne de conséquence. Ils sont beaucoup plus faciles à interpréter (années de vie perdues, quantité d'espèces disparues), mais les incertitudes des modèles sont importantes. Il est donc intéressant de grouper les deux approches.

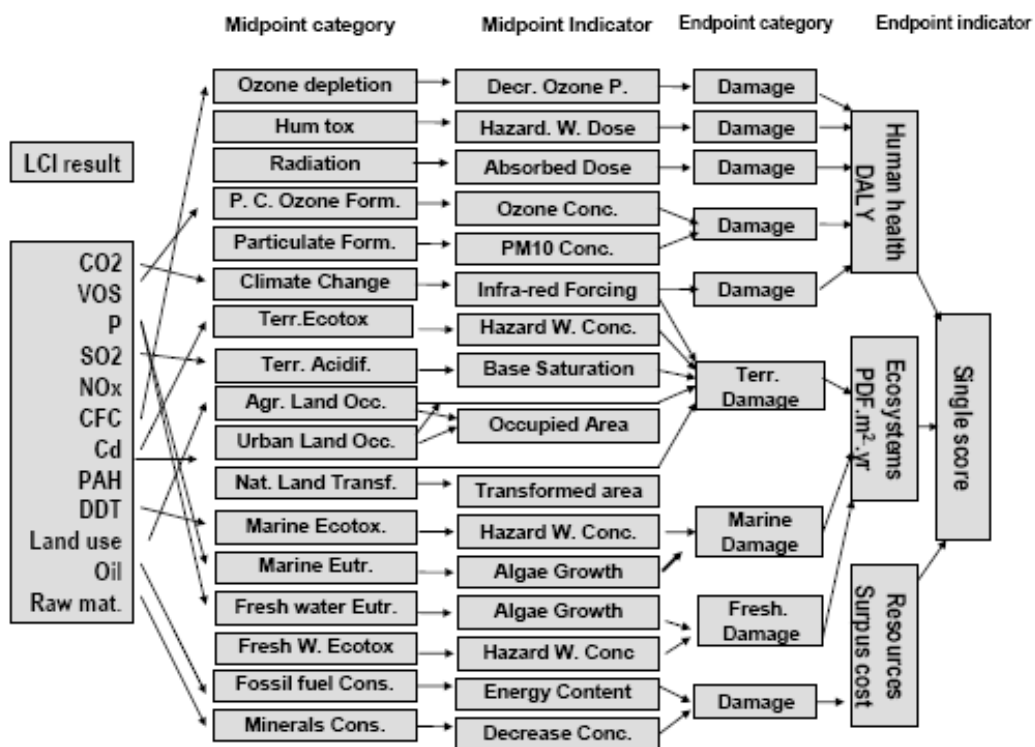


Figure 2 : Catégorie d'impact et voie d'impact couverte par la méthodologie ReCiPe, extrait de (EC-JRC, 2010)

Les paragraphes suivants donnent une description succincte des thématiques environnementales et des indicateurs associés à l'analyse de cycle de vie des bâtiments et des quartiers selon les trois aires de protection évaluées en ACV : les ressources, les écosystèmes et la santé humaine.

1.1.4.2. PRÉSERVER LES RESSOURCES

Économiser l'énergie : demande cumulative d'énergie PCI vs PCS

L'indicateur de demande cumulative d'énergie (CED) reflète la nécessité de préserver les ressources énergétiques. Le parc bâti représente aujourd'hui plus de 40 % de la consommation énergétique française. Plusieurs méthodologies de caractérisation existent aujourd'hui pour cet indicateur. Les différentes options méthodologiques concernent l'intégration des énergies renouvelables, la distinction entre énergie collectée et collectable, le facteur de caractérisation lié à l'énergie nucléaire, et l'utilisation du pouvoir calorifique inférieur ou supérieur pour l'évaluation des combustibles (Frischknecht et al., 2015).

L'indicateur de demande cumulative d'énergie (CED) utilisé dans le cadre de cette thèse tient compte des énergies limitées en flux ou en puissance (énergies non renouvelables, énergies de réseau renouvelables ou non, énergies de stock). En effet, consommer du bois énergie ou de l'électricité hydraulique contribue à réduire la ressource pour d'autres utilisateurs ; à l'inverse, consommer l'énergie produite par des panneaux solaire sur son toit ne diminue pas l'accessibilité de la ressource. L'indicateur est basé sur le pouvoir calorifique supérieur (PCS) des combustibles (CED = PCS pour les combustibles). L'uranium est comptabilisé sur la base d'un contenu énergétique de 560 000 MJ/kg. On considère l'énergie potentielle de l'eau pour l'hydraulique et une énergie primaire de 1 MJ/MJ pour les énergies renouvelables.

Cet indicateur est parfois considéré comme un indicateur intermédiaire, car il n'est pas directement relié à une pression sur l'environnement. En conséquence, il n'est pas inclus dans la liste des indicateurs recommandés par l'ILCD. Il est cependant considéré comme très robuste et bien compris par les non-spécialistes de l'ACV et notamment les professionnels du secteur du bâtiment. Comme indiqué dans la récente revue de littérature de Cabeza et al (2014), il est parfois le seul indicateur dans les études de cycle de vie portant sur les bâtiments (Scheuer et al., 2003 ; Crawford et al., 2006 ; Himpe et al., 2013).

Économiser l'eau : consommation d'eau

La consommation d'eau est également un indicateur de consommation de ressource. L'eau douce est une ressource limitée, surtout dans certaines régions comme le pourtour méditerranéen, régulièrement en situation de stress hydrique. Les changements climatiques risquent également d'augmenter ce stress (Murray et al., 2012). Les usages domestiques en France représentent près d'un quart de l'eau consommée⁶. L'indicateur présenté dans le tableau ci-dessus prend en compte les volumes d'eau des rivières et des nappes phréatiques prélevés sur l'ensemble du cycle de vie, mais pas l'eau de mer, considérée comme non

⁶ <http://www.eaufrance.fr/observer-et-evaluer/pressions-sur-les-milieux/prelevements/>

limitée. L'accent est mis sur l'eau douce et l'eau potable. L'objectif de préservation de la ressource en eau tient compte de la perturbation que l'homme peut exercer sur le cycle de l'eau. Les effets de pollution de l'eau sont par contre pris en compte dans d'autres indicateurs.

Une limitation importante de l'indicateur présenté dans le Tableau 2 est qu'il ne tient pas compte de la rareté de la ressource en eau. De plus, la consommation d'eau brute est comptabilisée, négligeant le fait qu'un procédé puisse rejeter l'eau et avoir une consommation nette beaucoup plus faible que la consommation brute. La méthode *Ecological Scarcity* (FOEN, 2006) permet de prendre en compte la rareté de la ressource par un classement en six niveau de rareté. Cette méthode a été reprise dans les recommandations de l'ILCD. D'autres méthodes très prometteuses ont récemment vu le jour (Boulay et al., 2015 ; Berger et al., 2014) mais ne sont pas directement accessibles dans les bases de données car elles nécessitent d'augmenter le niveau de détail des inventaires de flux (Kounina et al., 2012).

Préserver les matières premières : l'épuisement des ressources abiotiques

Le dernier indicateur de ressource concerne l'épuisement des ressources abiotiques, c'est-à-dire des ressources minérales et fossiles. Il s'agit d'encourager la préservation de ces ressources pour que celles-ci restent accessibles aux générations futures. De nombreux flux relatifs aux bâtiments contribuent à cet indicateur (p. ex. chauffage, matériaux de construction, transport des matériaux).

Il existe de nombreuses méthodes de caractérisation de cet impact. Plusieurs auteurs ont souligné le manque de consensus entre les approches (Steen, 2005 ; Klinglmair et al., 2013). Suivant la méthode retenue, le nombre de substances comptabilisées peut être très variable. Le type de réserve diffère également (p. ex. : réserves prouvées, ultimes), la vitesse d'extraction de la ressource n'est pas toujours prise en compte (p. ex. : prise en compte dans CML 2002 mais pas dans EDIP 97). Certaines méthodes différencient les ressources fossiles et minérales alors que d'autre les agrègent sous la même unité.

La méthode CML 2002 propose un facteur d'équivalence entre les ressources fossiles et minérales, permettant de les agréger. Le facteur de caractérisation associé à un combustible fossile tient compte de son pouvoir calorifique inférieur (Jeroen Guinee, 2002) en plus des réserves ultimes et du taux d'extraction. Les réserves et le taux d'extraction sont donnés en moyenne pour l'ensemble des combustibles fossiles, considérés comme substituables. Cela permet d'avoir un indicateur unique même si les enjeux de l'épuisement des ressources minérales (qui se retrouvent ensuite dans les mines urbaines et seront peut-être récupérables) et fossiles (qui sont majoritairement dégradées par combustion) sont différents. Les combustibles fossiles ont tendance à être largement prédominants dans le calcul de l'impact d'épuisement des ressources avec la méthode CML 2002. Neuf ordres de grandeur séparent le facteur de caractérisation du pétrole de celui du fer, quatre séparent le plomb et le pétrole (Klinglmair et al., 2013).

1.1.4.3. PRÉSERVER LES ÉCOSYSTÈMES

Réduire les déchets : déchets produits

Le secteur du bâtiment génère un volume important de déchets, même si ceux-ci sont en grande partie inertes. D'où un indicateur de déchets produits, où les volumes de déchets sont pondérés par la catégorie (faible poids pour les déchets inertes, moyen pour les déchets banals, et élevé pour les déchets dangereux dont le conditionnement demande de grandes précautions). Cet indicateur permet de prendre en compte les initiatives de recyclage et de valorisation des déchets dans le secteur du bâtiment. Il recouvre à la fois une thématique de toxicité, d'encombrement et d'économie circulaire.

Des indicateurs de déchets sont présents dans la norme européenne EN 15978 et l'ancienne norme française NF XP P01-020-3, parfois sous forme désagrégée. En revanche, aucun indicateur de ce type n'est repris dans les dernières recommandations de l'ILCD.

Réduire les déchets radioactifs : déchets radioactifs

Un deuxième indicateur de déchet est présent, et concerne les déchets radioactifs, principalement issus de la production d'électricité d'origine nucléaire. Cet indicateur, exprimé en dm^3 de déchets reflète les impacts potentiels liés au nucléaire (radioactivité, accidents, poids de la gestion des déchets pour les générations futures). L'indicateur permet de mettre ce thème particulier à part, surtout dans le contexte français où près des trois quarts de l'électricité consommée est produite par des centrales nucléaires.

D'autres indicateurs existent comme le calcul des radiations ionisantes (Frischknecht et al., 2000). L'indicateur obtenu permet d'évaluer les impacts de la radioactivité sur la santé humaine et peut être parallèlement agrégé au sein de l'indicateur de dommage sur la santé humaine. Cependant, l'indicateur de radiations ionisantes ne tient pas compte de la problématique des déchets à longue durée de vie et des potentiels accidents.

Protéger le climat : effet de serre

L'indicateur concernant les changements climatiques ou effet de serre est un indicateur potentiel calculé selon la méthode élaborée par le GIEC (Solomon, 2007). Celle-ci évalue la contribution des différents gaz à l'effet de serre à travers leur forçage radiatif, sur un horizon de 100 ans. Cet indicateur est mis à jour régulièrement, en fonction de l'évolution des travaux du GIEC. Il est considéré comme très robuste aujourd'hui. Il est omniprésent dans les études ACV et l'un des indicateurs les mieux connus des non-spécialistes. Cependant, certains chercheurs le remettent en cause au niveau de sa prise en compte des moments d'émissions et de la comptabilisation du carbone biogénique (Cherubini et al., 2012 ; Levasseur et al., 2010).

Protéger la faune et la flore : acidification

L'indicateur d'acidification concerne le phénomène des pluies acides, liées entre autres à l'émission de composés azotés ou soufrés dans l'atmosphère. La production de chaleur ou d'électricité par des centrales au charbon ou au lignite est emblématique du phénomène de pluies acides. L'acidification des milieux a des conséquences importantes sur la faune et la flore. Elle entraîne un effet de lessivage des nutriments et améliore la biodisponibilité de

certaines composés toxiques comme les métaux lourds. La plupart des méthodes se focalisent actuellement sur l'acidification terrestre, les modèles évaluant l'acidification aquatique (eaux douces) étant encore peu performants. La méthode CML considère à la fois l'acidification terrestre et aquatique. Elle est considérée comme robuste et se trouve assez bien notée par l'ILCD. Cependant, les recommandations finales sur les indicateurs potentiels lui préfèrent la méthode développée en 2006 par Seppälä (Seppälä et al., 2006). Cette dernière utilise un modèle de dispersion des polluants dans les milieux naturels plus récent. Les caractéristiques régionales sont mieux prises en compte dans la méthode de Seppälä par rapport aux moyennes européennes considérées dans la méthode CML 2002.

L'acidification des océans n'est pas incluse dans les indicateurs d'acidification ACV (Chomkamsri et al., 2011). Elle est liée à l'augmentation des émissions de CO₂, dont une grande partie est captée par l'océan (Doney et al., 2009). L'acidification des océans est considérée comme une des principales sources de perte de biodiversité marine à l'heure actuelle (Kroeker et al., 2013). De récents travaux proposent son intégration dans la chaîne de cause à effet de l'acidification (Zelm et al., 2015).

Protéger les rivières et les lacs : eutrophisation

Le phénomène d'eutrophisation concerne l'augmentation de la concentration en nutriments (éléments azote - N - ou phosphore -P-) dans un milieu naturel (Smith et al., 1999). La principale contribution du secteur du bâtiment concerne l'évacuation des eaux usées. Celles-ci peuvent être chargées en substances phosphatées et/ou azotées présentes notamment dans les lessives et autres détergents. Lorsque ces substances sont déversées dans les milieux aquatiques naturels (lacs, rivières ou mers...), elles entraînent une prolifération de la matière organique qui diminue la transparence de l'eau et peut conduire au phénomène d'eau morte, où plus aucun organisme ne peut subsister dans le milieu. L'utilisation de tensio-actifs à base végétale dans les détergents ou la mise en place de toilettes sèches ou de systèmes de phyto-épuration contribue à limiter l'impact du bâtiment sur ce phénomène. L'utilisation des phosphates dans les détergents et autres produits ménagers a décru de façon très importante ces dix dernières années alors que les rejets de nitrates, principalement d'origine agricole, sont restés stables.

Limitier les émissions toxiques / Protéger la qualité de l'air extérieur : production d'ozone photochimique

La production d'ozone photochimique concerne un phénomène de production d'ozone de basse altitude lié notamment à l'émission de composés organiques volatiles (COV) et d'oxydes d'azote (NO_x) dans l'air. Ces éléments se décomposent sous l'action du soleil et interagissent, ce qui conduit à l'accumulation d'ozone, habituellement rapidement dégradée en l'absence de COV. Le secteur des transports est le principal émetteur de dioxyde d'azote, notamment à cause des véhicules diesel (presque la moitié des émissions en 2013⁷). Le secteur résidentiel est le premier émetteur de COV (40 % des COV émis en 2013)

⁷ <http://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/aep-item/oxydes-d-azote>

à travers les chaudières et l'utilisation domestique de solvants⁸. L'ozone est un composé très toxique, affectant les voies respiratoires.

Protéger les écosystèmes : dommages à la biodiversité

Cet indicateur est un indicateur de dommage ; il correspond à une « aire de protection ». Il représente un ensemble de phénomènes décrits plus haut qui affectent les écosystèmes. Le modèle utilisé dans la méthode Eco-indicator 99 tient compte de l'acidification et de l'eutrophisation des milieux ainsi que de l'occupation et de la transformation des sols. Ces différentes pressions sur les écosystèmes sont évaluées en fraction d'espèces disparues par m² et par an puis agrégées pour donner un indicateur global de dommages à la biodiversité. L'ILCD considère qu'aucune des méthodes existantes n'est réellement satisfaisante pour évaluer les dommages aux écosystèmes.

La biodiversité est une notion difficile à appréhender, car couvrant l'ensemble de la complexité du vivant. Elle peut de façon simplifiée être définie par la somme de la diversité des écosystèmes, de la diversité des espèces et de la diversité génétique. On lui associe également la notion de fonctions ou services écologiques. Les méthodes utilisées en analyse du cycle de vie ne couvrent généralement qu'un voire deux aspects de la biodiversité, généralement la diversité des espèces. Par rapport aux cinq grandes pressions identifiées par le *Millenium Ecosystem Assessment (MA, 2005)* comme pesant sur la biodiversité, trois seulement sont couvertes par les indicateurs ACV (Pollution, Changement des habitats et changement climatique), la question des espèces invasives et de la surexploitation étant pratiquement absentes des méthodes opérationnelles existantes (Curran et al., 2011).

1.1.4.4. PRÉSERVER LA SANTE HUMAINE

Limiter les émissions toxiques / Protéger la santé humaine : dommages à la santé

De même que pour l'indicateur de dommages à la biodiversité, l'indicateur de dommages à la santé humaine utilisé dans la méthode Eco-indicator 99 fait la synthèse de multiples phénomènes, affectant la santé humaine :

- émissions de substances toxiques (cancers) ;
- appauvrissement de la couche d'ozone (cancers) ;
- ozone photochimique et émissions de particules fines (affections des voies respiratoires) ;
- changement climatique (maladies infectieuses, cardiovasculaires, respiratoires, déplacements de populations) ;
- radiations ionisantes (cancers).

Le résultat s'exprime en années de vie en bonne santé perdues (DALY). Cependant, de même que pour l'indicateur de dommages à la biodiversité le résultat comporte de grandes incertitudes. Seules les méthodes de détermination des dommages (années de vies perdues) concernant les particules fines et l'ozone photochimique sont recommandées par l'ILCD.

⁸ <http://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/aep-item/composes-organiques-volatils>

Protéger la qualité de l'air extérieur : odeur

L'indicateur d'odeur est basée sur une méthode de volume critique, qui considère une concentration seuil à partir de laquelle 50 % d'une population détecte l'odeur. Le volume émis est pondéré par sa concentration seuil, ce qui permet d'agréger les volumes émis en tenant compte de leur pouvoir olfactif différent. Cet indicateur est peu utilisé dans le domaine de l'ACV.

1.1.4.5. À L'ÉCHELLE DU QUARTIER

Les indicateurs présentés ont été développés pour l'analyse des bâtiments. À l'échelle du quartier il est important de considérer de façon distincte un indicateur d'usage des sols (Lotteau et al., 2015).

L'usage des sols par les activités humaines a des conséquences importantes sur la qualité des sols et le fonctionnement des écosystèmes. La destruction et la fragmentation des habitats naturels est un des risques les plus importants pour la biodiversité (MA, 2005). De nombreuses méthodes de caractérisation de l'usage des sols existent aujourd'hui en ACV (Canals et al., 2006). Ces méthodes sont soit tournées vers une perte de qualité des sols, soit vers une perte de biodiversité (Chomkamsri et al., 2011).

Deux types d'interventions sur les sols interviennent (voir Figure 3) :

- la transformation d'un sol, événement ponctuel : urbanisation d'un espace naturel par exemple ;
- l'occupation d'un sol, pendant une durée donnée : occupation du sol urbanisé qui ne peut pas retourner à son état naturel pendant la durée d'occupation.

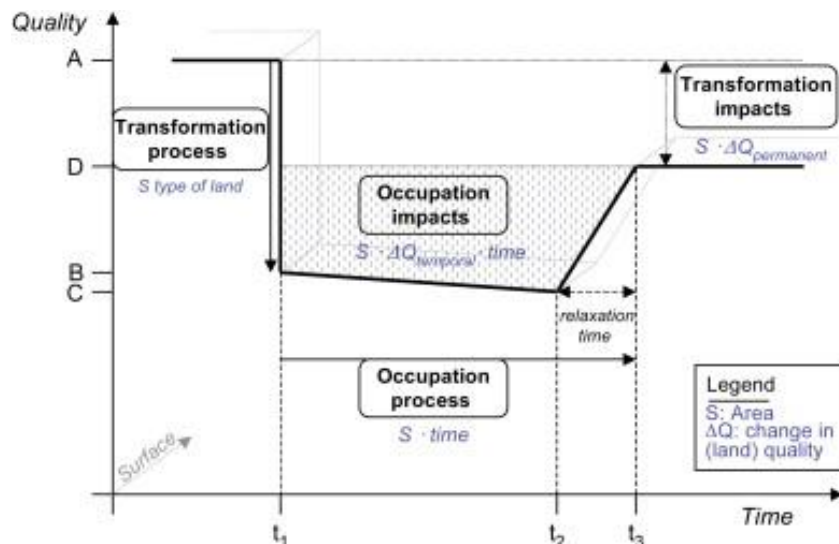


Figure 3 : Occupation et Transformation des sols, Milà y Canals 2007.

Allacker et al. (2014) recommandent d'utiliser deux indicateurs dans le cadre de l'évaluation des ensembles bâtis : la méthode de Milà i Canals et la méthode Eco-Indicator 99. La première est basée sur la qualité des sols à travers une évaluation de la quantité de matière organique (Milà i Canals et al., 2007). La deuxième évalue une perte de

biodiversité à partir de la relation aire-espèce. Cette relation proposée pour la première fois par Arrhenius en 1921 établit un lien entre la diversité des espèces d'un milieu et la taille de celui-ci : plus la taille de l'espace diminue plus les espèces disparaissent.

La méthode de Milà y Canals n'étant pas opérationnelle à l'heure actuelle car non implémentée dans les bases de données comme ecoinvent, seule la méthode Eco-Indicator 99 est utilisée pour l'analyse du cycle de vie des quartiers.

1.2. APPROCHE CONSÉQUENTIELLE EN ACV

1.2.1. Définition et Objectif de l'étude

On définit l'ACVC comme « un processus de modélisation visant à décrire les conséquences d'une décision » (Weidema et al., 2009). Contrairement à l'ACV attributionnelle, qui donne une photo d'un système à un instant « t » dans un contexte figé, l'ACV conséquentielle cherche à prendre en compte les interactions entre le système étudié et le système d'arrière-plan, qui peut évoluer. Le système d'arrière-plan est défini par opposition au système étudié, comme tout ce qui est hors des frontières du système étudié : contexte socio-économique et infrastructurel par exemple.

Vieira et Horvath (2008) résument la différence entre les deux méthodes par « l'impact du produit » versus « l'impact de la décision d'acheter le produit ». Pour faire l'analogie avec le secteur du bâtiment, cette définition pourrait devenir : l'impact du bâtiment versus l'impact de la décision de construire/rénover/déconstruire le bâtiment.

L'ACVC est parfois dénommée de façon abusive « ACV prospective » dans la littérature. Cependant, comme le font remarquer Sandén et Karlström (2007), elle peut être appliquée de manière rétrospective (Et si telle décision avait été prise ?) ou prospective (Que se passera-t-il si telle décision est prise ?). Le point de départ temporel de l'étude, le fait de considérer des impacts passés ou futurs, n'est pas lié à son aspect conséquentiel ou attributionnel qui participe d'une allocation différente des impacts du système étudié.

L'intérêt de la méthode conséquentielle réside dans la révélation d'impacts (positifs ou négatifs) non pris en compte dans l'ACVA et liés au contexte économique ou infrastructurel. Suivant l'exemple de Sandén et Karlström (2007) sur le platine, une demande accrue en platine dans un secteur ne va pas forcément se traduire par plus d'extraction de minerais de base ; elle peut entraîner une augmentation du prix qui en partie stimule l'extraction mais aussi le recyclage, et d'autre part réduit la demande en platine pour d'autres secteurs.

L'ACV-C donne donc une estimation de ces répercussions, définies par Ekvall (2000) comme « les conséquences environnementales extérieures à la chaîne de valeur, mais qui résultent des forces de marché ». Un paramètre peut être ajouté à cette définition : outre les forces de marché, ce sont aussi les infrastructures et les services publics qui peuvent être affectés.

Les principales différences méthodologiques entre ACVA et ACVC sont résumées dans le Tableau 4, extrait des travaux de Brander et al (2008). Elles sont décrites plus en détail dans les paragraphes suivants qui reviennent sur les différentes étapes de l'ACV affectées par la mise en place d'une approche conséquentielle : définition des frontières du système, inventaire de production.

Tableau 4 : Principales différences entre ACVA et ACVC, (tiré de Brander et al., 2008)

	Attributional LCA	Consequential LCA
Question the method aims to answer	What are the total emissions from the processes and material flows directly used in the life cycle of a product?	What is the change in total emissions as a result of a marginal change in the production (and consumption and disposal) of a product?
Application	ALCA is applicable for understanding the emissions directly associated with the life cycle of a product. ALCA is also appropriate for consumption-based emissions accounting. ALCA is not an appropriate approach for quantifying the change in total emissions resulting from policies that change the output of certain products.	CLCA is applicable for informing consumers and policy-makers on the change in total emissions from a purchasing or policy decision. CLCA is not appropriate for consumptionbased emissions accounting.
System boundaries	The processes and material flows directly used in the production, consumption and disposal of the product.	All processes and material flows which are directly or indirectly affected by a marginal change in the output of a product (e.g. through market effects, substitution, use of constrained resources etc).
Double-counting and accounting for absolute emissions	No double-counting of emissions. The emissions allocated to one product in an ALCA will not to allocated to other products in other ALCAs. In theory, if ALCAs were conducted for all products the sum of the results would equal total emissions from consumption ¹ .	Double-counting of emissions. The scope of different CLCAs may overlap and the same emissions may be counted in multiple CLCAs. If CLCAs were conducted for all products the sum of the results may be multiple times higher (or lower) than total emissions from consumption.
Marginal or average data	ALCA tends to use average data, e.g. the average carbon intensity of the electricity grid.	CLCA tends to use marginal data e.g. the marginal carbon intensity of the electricity grid.
Market effects	ALCA does not consider the market effects of the production and consumption of the product.	CLCA considers the market effects of the production and consumption of the product.
Allocation methods	ALCA allocates emissions to coproducts based on either economic value, energy content, or mass.	CLCA uses system expansion to quantify the effect of co-products on emissions.
non-market indirect effects	ALCA does not include other indirect effects.	CLCA should include all other indirect effects, such as the interactions with existing policies or the impact of R&D on the efficiency of the production of other products.
Time-scales, means by which change is promoted, and magnitude of the change	ALCA aims to quantify the emissions attributable to a product at a given level of production at a given time.	CLCA aims to quantify the change in emissions which result from a change in production. It is necessary to specify the time-scale of the change, the means by which the change is promoted, and the magnitude of the change.
Uncertainty	ALCA has low uncertainty because the relationships between inputs and outputs are generally stoichiometric	CLCA is nearly always highly uncertain because it relies on models that seek to represent complex socio-economic systems that include feedback loops and random elements.

1.2.2. Définition des frontières du système

Bien que leurs processus de modélisation soient similaires, la grande différence entre l'ACVA et l'ACVC se situe au niveau de la définition du périmètre, donc des flux et procédés à prendre en compte dans l'étude (Zamagni et al., 2012). Dans le premier cas, on suit la chaîne de valeur du produit/service étudié et les flux d'énergies et de matières qui lui sont liés. Dans le cas de l'ACVC, sont pris en compte les flux affectés par la décision que l'on souhaite évaluer.

Les conséquences à prendre en compte dans le cadre d'une ACVC peuvent être classées en trois catégories (Sandén et Karlström, 2007 ; Dandres, 2012) :

- Les conséquences de premier ordre représentent l'augmentation de production et d'activité nécessaire au niveau du premier plan du système étudié pour la réalisation de la décision étudiée. Ces conséquences sont prises en compte en ACVA. La production d'une voiture supplémentaire implique la production de quatre roues et d'un moteur, produits intégrés au premier plan du système étudié « voiture ». Dit autrement, en ACVA comme en ACVC, la production d'une voiture implique la production d'un moteur.
- Les conséquences de second-ordre traduisent les effets de marché : contraintes de capacité de production, contrainte de ressources, effet de variation des prix, effet rebond. On peut identifier deux niveaux de détermination des conséquences de second ordre : l'identification des processus affectés, appelés processus marginaux et les effets de non-linéarité entre demande et production. La première étape est une analyse de la compétitivité et de la disponibilité des technologies : les pneus de la voiture vont être produits par le fournisseur le moins cher disponible sur le marché. Elle concerne également les effets de substitution : le démantèlement de la voiture va permettre d'injecter des matériaux sur le marché du recyclage et éviter ainsi la production de matière vierge. La deuxième étape évalue les effets de la variation de la demande sur l'évolution des prix et en conséquence la variation de la consommation des autres secteurs. Elles sont généralement étudiées à travers l'utilisation de modèles macro-économiques globaux, représentant l'ensemble des secteurs. L'unité fonctionnelle doit être suffisamment importante pour affecter les autres secteurs économiques et avoir un impact sur les prix.
- Les conséquences de troisième ordre. Elles correspondent à des impacts de long terme d'évolution des technologies. L'utilisation d'une technologie innovante entraîne par exemple une baisse de son coût (effet d'échelle) et une optimisation de sa production. Ces effets peuvent être pris en compte à travers des courbes d'expérience par exemple. Ces conséquences sont rarement modélisées en ACV car très complexes. Elles sont évoquées en particulier dans les travaux de Sandén et Karlström (2007) et de Kätelhön et al. (2015).

1.2.3. Inventaire de production : hypothèses de modélisation

1.2.3.1. DONNÉES MOYENNES VERSUS DONNÉES MARGINALES

Après avoir clairement défini la problématique de l'étude, reconnu la modélisation conséquentielle comme pertinente, on doit déterminer dans quelles situations vont apparaître des perturbations et identifier les technologies affectées (ou technologies marginales). On peut suivre la procédure développée dès 1999 par Weidema (1999) et mise à jour récemment dans le guide méthodologique précité (Weidema et al., 2009).

On examine alors cinq points :

- l'échelle de l'étude :
 - petite échelle (changement marginal) n'affectant pas la tendance du marché et les prix ;
 - grande échelle : affectant le marché, introduisant de nouveaux fournisseurs, des nouveaux produits ou technologies de façon significative (les conséquences ne varient plus de façon linéaire par rapport au changement de production étudié) ;
- l'horizon temporel :
 - court ou long terme : un changement de court terme affecte l'intensité d'utilisation des moyens de production, mais pas la structure des moyens de production ;
 - long terme : ce type de changement va affecter les investissements en capacité de production et implique de prendre en compte l'évolution du système d'arrière-plan dans le temps (par l'usage de scénarios) ;
- les limites du marché :
 - segmentation : temporelle (heure creuse, heure de pointe), géographique ;
 - clientèle (un ou plusieurs types de clients affectés) ;
 - marché de niche ;
- les tendances économiques : marché à la hausse ou à la baisse ;
- les changements dans l'offre et la demande : élasticité des prix, ressources contraintes (quotas...).

Concernant la notion d'échelle, on peut questionner l'hypothèse généralement admise de négliger l'impact d'une unité de petite échelle sur son système d'arrière-plan. Ce sont bien des choix individuels qui tous ensemble créent finalement une tendance et engendrent des impacts de masse. L'ACV conséquentielle est à ce titre pertinente même à l'échelle de chaque bâtiment ou quartier.

En ACVC, la modélisation des procédés affectés par la décision prise utilise préférentiellement des données marginales au lieu de données moyennes généralement utilisées en ACVA (Tillman, 2000). Il faut noter également ici que, comme évoqué précédemment, l'usage des données marginales n'est pas systématique. Comme expliqué par Ekvall et al. (2005), les activités ayant seulement des effets marginaux doivent être

modélisées par des données marginales alors que les activités pour lesquelles la décision peut impulser des changements complets (e. g. effets de seuil, alors à inclure dans le système de premier plan) doivent être modélisées avec des données moyennes. Les données marginales peuvent également être équivalentes aux données moyennes si aucune contrainte technico-économique n'est identifiée : cas d'un seul procédé de fabrication existant et de ressources non contraintes par exemple.

1.2.3.2. DÉTERMINATION DES TECHNOLOGIES MARGINALES DE PRODUCTION

Le projet étudié nécessite pour sa réalisation la production de matériaux et d'énergie. Il peut également générer une production de matériaux (déchets réutilisables ou recyclables) ou d'énergie exportée (production locale, déchets valorisables). Il impose donc sur le marché une demande ou une offre supplémentaire de production. Cette demande/offre supplémentaire va devoir être satisfaite ou écoulee sur les marchés correspondants, ce qui affecte les technologies productrices de ce marché (de matériaux, d'énergie).

Pour déterminer les technologies affectées (les technologies marginales de production), il est nécessaire d'analyser le type de marché : marché mondial (par exemple l'aluminium), marché local (par exemple chaleur), marché régulé (par exemple électricité), très concurrentiel (par exemple *High Tech*), etc. et de déterminer quelle technologie est en mesure de faire varier sa production à court terme et quelle technologie va ajuster sa capacité de production à moyen-long terme. Ceci suppose d'analyser la compétitivité des différentes technologies productrices puis les éventuels « facteurs limitants » ou contraintes de production présentes.

La technologie marginale à la hausse possède deux qualités : elle est disponible (non contrainte) et parmi les technologies disponibles, elle est la plus intéressante au niveau économique. La technologie à la baisse est la technologie la moins rentable en fonctionnement.

Plusieurs raisons peuvent contraindre la production de matières/produits ou d'énergie:

- Accès aux ressources : les matières premières, intrants, sont en quantité limitée et limitent la quantité de produits en sortie.
- Capacité : les capacités de production fonctionnent à plein régime et ne peuvent produire plus.
- Quotas de production : la quantité de produits productible est fixée et ne peut être dépassée (quotas de pêche, par exemple).
- Stockage : impossibilité de gestion efficace de la ressource, par le stockage notamment, conduisant à une perte de ressource ou à un prix trop élevé (stockage de l'électricité par exemple).

Si l'accès aux ressources contraint la production, comme c'est le cas pour certaines matières recyclées (par exemple aluminium : la quantité de matière à recycler collectée est limitante), seule une mise à disposition plus importante de matière première (recyclage en sortie) peut permettre d'augmenter la production. Ceci implique que pour ce type de matériaux, une demande accrue va entraîner un déplacement de production vers un

substitut. Par exemple, une demande accrue en aluminium recyclé va entraîner la production d'aluminium d'origine minière. *A contrario*, la matière recyclée mise à disposition va être directement utilisée sur le marché du recyclage. Au niveau de la comptabilisation des impacts évités du recyclage en ACVC, il est donc logique de comptabiliser les impacts évités seulement en sortie (mise à disposition de matière recyclée) et non en entrée (utilisation de matière recyclée).

Si la capacité de production constitue le facteur limitant, l'augmentation de la production sera également réalisée par d'autres technologies mais, sur le moyen / long terme, de nouvelles capacités de production peuvent être développées. Ceci peut être le cas d'une demande accrue en énergie renouvelable (contrat 100% EnR pour l'électricité par exemple) pouvant soutenir la mise en place de nouvelles capacités de production. On peut faire un raisonnement similaire pour une demande accrue en produits agricoles biologiques entraînant des conversions supplémentaires des terrains. Dans le troisième cas, où la quantité de matière produite est limitée par des quotas, une demande accrue entraîne également un déplacement de production vers des substituts avec potentiellement une augmentation de capacité de production de ces substituts.

Une des phases les plus délicates est donc la phase d'inventaire, soit l'identification et la quantification des flux. Comme introduit précédemment, cette étape nécessite l'appui d'outils parallèles à l'ACV. Ces méthodes aident en particulier à identifier les technologies marginales et à quantifier ensuite les répercussions économiques. Par exemple, une analyse technico-économique va permettre de déterminer la technologie disponible la plus compétitive sur le marché. Cette technologie sera celle qui produira la ressource nécessaire pour le système étudié (la technologie marginale) et sur laquelle se base ensuite l'évaluation de la consommation des ressources primaires et les émissions de polluants.

Les modèles économiques peuvent également révéler une surproduction ou des effets de substitution entre secteurs. En effet, si le système étudié induit une augmentation de la consommation d'un produit A et que la production de ce produit A est contrainte et ne peut être augmentée, alors un autre secteur consommateur de produit A va devoir réduire sa consommation de A en lui substituant un produit B. Dans le cas de l'ACV, il va falloir comptabiliser les ressources et les émissions de polluants liées à la production de ce produit B, dont la production a été déclenchée par l'augmentation de la demande sur A.

1.2.3.3. GESTION DES INFRASTRUCTURES

Une autre différence entre les deux approches concerne la gestion des infrastructures. En ACVA, les infrastructures sont incluses dans la chaîne de valeur d'un produit ou service. En ACVC, les conséquences directes à court terme peuvent concerner uniquement le fonctionnement des capacités productives. En effet, le respect du principe de causalité implique que les technologies de production mobilisées ont déjà été construites et donc les impacts environnementaux liés déjà générés. Par contre, sur le long terme, l'utilisation d'un produit/service va contribuer au renouvellement des installations et des infrastructures. Les installations mises en place dans le futur peuvent être différentes de celles en place actuellement et satisfaisant la demande supplémentaire. Si aujourd'hui une variation à la

hausse de la demande en électricité est satisfaite par des centrales au gaz, il est probable qu'une augmentation de la demande en électricité favorise l'installation d'éoliennes sur le long terme. En première approximation, il est possible de considérer que les capacités utilisées seront les capacités renouvelées. Il y a alors équivalence entre ACVA et ACVC au niveau de la gestion des infrastructures.

1.2.3.4. ALLOCATIONS ET EXPANSION DU SYSTÈME

Dans la même logique, on cherche à éviter les allocations (cas d'une technologie produisant plusieurs produits) grâce à l'expansion du système (Suh et al., 2010), comme préconisé par de nombreux chercheurs et par la norme ISO 26 000 (Ekvall and Weidema 2004; Tillman 2000 ; Finnveden et al. 2009 ; Sandén and Karlström 2007). La method des "impacts évités" est une des techniques de l'expansion du système, dont le principe est illustré dans la Figure 4. Il faut prendre garde à ne pas la confondre avec une approche « d'allocation par activité alternative » qui elle n'est pas adaptée à l'ACV conséquentielle, selon certains chercheurs (Majeau-Bettez et al., 2015).

Dans la Figure 4, le « Process 2 » correspond à la production de B évitée par la production supplémentaire du « Process 1 » et correspond à une technologie pouvant effectivement baisser sa production (e.g. technologie marginale). Dans le cas d'une allocation par activité alternative, le « Process 2 » correspondrait à une technologie proche du « Process 1 » mais ne produisant que B. Le « Process 2 » serait en fait utilisée comme approximation pour modéliser la production de B dans le « Process 1 » afin de déduire les caractéristiques de production du produit A (qui est le produit étudié).

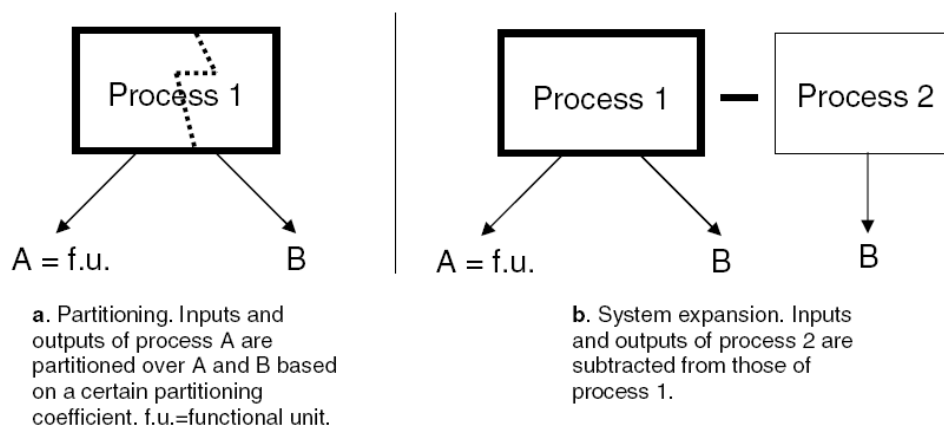


Figure 4 : Illustration du concept d'allocation par expansion du système (Source : Suh et al. (2010)).

Le traitement des coproduits par expansion du système varie suivant le cas considéré : recyclage en boucle ouverte ou procédés à produits multiples. Dans le cas des procédés à produits multiples, on peut également distinguer trois cas : les deux produits sont fabriqués de façon indépendante, la demande en produit A (étudié) dépend de la demande en produit B (non étudié), et inversement. Ces différentes procédures d'allocation ont été bien explicitées par Ekvall et Weidema (2004).

1.2.4. Modèles associés à l'approche conséquentielle

L'implémentation d'une approche conséquentielle de façon conjointe à la prise en compte des variations temporelles en ACV nécessite le support de modèles connexes aptes à décrire et expliciter les mécanismes liants le système étudié à son environnement.

Ainsi, Ekvall et Andrae (2006) soulignent la nécessité d'impliquer des experts en équilibres partiels lors d'une étude conséquentielle, afin d'améliorer les données d'entrée sur l'élasticité des prix, la production marginale et la consommation marginale. Ces équilibres peuvent aussi renseigner sur les effets rebonds directs (Ekvall, 2002). Cependant, l'utilisation de ces modèles n'est valable que dans le cas où le marché considéré n'influence pas les autres marchés, ou si son influence est limitée. Sinon, il faut revenir à un système d'équilibre général. Le niveau de détail des modèles partiels est généralement bien meilleur que celui des modèles globaux (tous secteurs économiques confondus).

Des modèles assez complexes basés sur les équilibres partiels ont récemment été développés lors d'études ACV conséquentielles, comme les MMR-PE : *Multi-Market Multi-Regional Partial Equilibrium* (Earles et Halog, 2011). Les auteurs ont également intégré dans leur étude des courbes d'expérience et les effets d'apprentissages. Une courbe d'expérience détermine empiriquement la relation entre la production cumulée et le coût unitaire. Ce type d'effet peut être inclus dans les modèles de prospective économique. Ces courbes sont alors utilisées pour quantifier la participation d'un investissement au développement futur d'une technologie : en faisant la promotion d'une technologie performante mais encore chère et à un stade peu industrialisé, on participe à son développement donc à la réduction de son coût par effet d'échelle, à son optimisation future ainsi qu'à la diffusion de l'information la concernant (Sandén et Karlström, 2007). L'introduction de ces méthodes dans l'ACV conséquentielle est encore récente et peu maîtrisée mais en développement. Cette approche présente des risques (double comptage d'une fraction de la technologie installée dans le futur par exemple).

Il s'agit dans tous les cas de trouver une manière de quantifier les effets induits par la décision prise. Comme montré précédemment, une approximation par ACVA peut être suffisante. Cependant, si plusieurs technologies sont en compétition sur le même marché, comme c'est le cas pour l'électricité, il va falloir modéliser la réaction du système électrique à une augmentation ou une diminution de la demande à satisfaire. Des mécanismes technico-économiques complexes sont en jeu. La section suivante développe le cas particulier du secteur énergétique et plus précisément électrique.

1.2.5. Modélisation des systèmes énergétiques et électriques

En ACV de manière générale et en ACV conséquentielle en particulier, savoir quelle source ou quel mix d'énergie est à prendre en compte dans l'étude et avec quelle intensité est un problème épineux (Soimakallio et al. 2011 ; Frischknecht and Stucki 2010 ; Curran et al. 2005). La difficulté du choix du mix approprié à l'objectif de l'étude, et notamment l'utilisation de

technologies marginales ou moyennes, était déjà soulevée dans les années 1990 (Dones et al., 1998).

En ACV conséquentielle, la méthode actuellement la plus utilisée consiste à déterminer la technologie concernée par un changement de capacité à long terme, dénommée technologie marginale à long terme. On fait ensuite l'hypothèse que la production marginale va être entièrement assumée par cette technologie. Or, le changement marginal de capacité va s'effectuer au sein d'un système énergétique impliquant plusieurs technologies. C'est pourquoi plusieurs études récentes plaident pour l'utilisation de modèles complexes simulant les systèmes énergétiques afin de déterminer un mix marginal de production au lieu de considérer « arbitrairement » une seule technologie marginale (Lund et al. 2010 ; Mathiesen et al. 2007 ; Mathiesen et al. 2009). Cela permet d'allier la dynamique des systèmes et l'analyse économique. Ces modèles introduisent généralement des hypothèses de développement à long terme du système énergétique (scénarios). Certains auteurs ont développé des mix électriques moyens « conséquentiel future » et « conséquentiel historique » afin de représenter la production marginale à long terme d'électricité (Schmidt et al., 2011). La méthode historique considère les variations de production ayant eu lieu entre 2000 et 2008, alors que la méthode future utilise des scénarios prospectifs à l'horizon 2020.

Connolly et al. (2010) ont effectué une revue critique analysant 37 modèles de simulation différents et leurs applications (voir également Gondal et Sahir (2011)). Six d'entre eux sont guidés par la demande (et peuvent donc considérer une demande marginale), et donnent une description détaillée du système électrique dans son ensemble (périmètre national et échanges aux frontières). Les résultats sont disponibles ou le seront prochainement au pas horaire, sur au moins une année entière (EMCAS⁹, ORCED (Stanton, 2008), ENERGY-PLAN (Lund, 2007), MARKAL-TIME (Assoumou, 2006), Mesap-Planet (Schlenzig, 1999), SimRen (Lehmann et al., 2003)).

Parmi ces modèles, seuls les modèles *Energy-Plan* et ORCED sont libres d'accès d'après l'étude de Connolly. Le modèle *EnergyPLAN* en particulier a été utilisé dans de nombreuses études, notamment conséquentielles (Lund et al., 2010). Le modèle ORCED a été développé spécifiquement pour les États-Unis. Il a été utilisé pour évaluer l'effet des véhicules hybrides sur le mix électrique américain¹⁰.

Le modèle MARKAL-TIMES est un modèle de prospective énergétique développé par Assoumou et l'équipe du Centre de Mathématique Appliquée de l'École des Mines de Paris (Assoumou, 2006). Il est donc applicable sur un horizon temporel lointain mais pas à court terme.

⁹ <http://www.dis.anl.gov/projects/emcas.html>

¹⁰ http://web.ornl.gov/info/ornlreview/v41_1_08/regional_phev_analysis.pdf

1.2.6. Écoconception des Bâtiments et des quartiers : Mise en Pratique

1.2.6.1. OBJECTIF DE L'ÉTUDE

L'objectif de l'étude ACV en écoconception est d'apporter une aide à la décision en phase avant-projet (esquisse par exemple). Il s'agit de réaliser une évaluation environnementale de différentes variantes de conception et de les classer par rapport à leur performance environnementale.

1.2.6.2. UNITÉ FONCTIONNELLE

L'unité fonctionnelle conséquentielle correspond à la décision de réaliser le programme ou pré-programme défini par le maître d'ouvrage. Le programme exprime les besoins que doit remplir le projet (nombre d'habitants, nombre d'occupants non résidents, nombre de m² construits, quantité de logements, de bureaux, etc.) et les contraintes qu'il doit satisfaire (règles d'urbanisme par exemple). On ajoute aux éléments du programme une durée d'étude (par exemple 80 ans) et la localisation géographique du projet (site précis s'il est défini). Des critères de confort sont établis : confort thermique (p. ex. température de consigne en hiver, nombre d'heures d'inconfort maximal en été), ventilation, éclairage en fonction des activités des bâtiments.

Plus l'étude environnementale intervient tôt dans le projet, plus il y a de leviers d'actions et plus la formulation de l'unité fonctionnelle peut être large et inclure un grand nombre de projets différents. On considère dans la suite que l'étude intervient au moment des premières esquisses. Le site du projet est déterminé, ainsi que les éléments majeurs du programme (nombre d'occupants, m² construits/rénovés) et les éventuelles contraintes d'urbanisme (hauteur maximale par exemple). Ceci correspond au cas le plus courant de l'utilisation des outils d'écoconception.

Les paragraphes suivants examinent les différentes conséquences intervenant suite à la décision de réaliser le programme. Un dernier paragraphe discute la pertinence de l'intégration des conséquences listées dans un outil d'aide à la conception des bâtiments et des quartiers.

1.2.6.3. FRONTIÈRES DU SYSTÈME

Les frontières du système définissent l'ensemble des paramètres à intégrer dans l'étude (pour l'ACV conséquentielle, l'ensemble des conséquences de la décision prise).

Périmètre initial de l'ACVA

Dans le cas de l'application de l'ACVC à un objectif d'écoconception, le périmètre minimum considéré dans l'étude est similaire à l'ACVA.

Pour un bâtiment neuf, le bâtiment n'existant pas au départ, sa réalisation va avoir comme conséquences *a minima* la production des produits et services nécessaires à l'ensemble des phases du cycle de vie du projet :

- phase de construction : fabrication, transport, montage des matériaux et des équipements composant le bâtiment, chantier ;
- phase d'exploitation : utilisation d'eau, d'énergie, génération d'eaux usées, maintenance et renouvellement ;
- phase de démolition : destruction du bâtiment, traitement en fin de vie des matériaux et équipements.

Dans le cas d'une réhabilitation, seuls les matériaux et procédés mobilisés ou affectés par la réhabilitation sont intégrés dans l'étude :

- phase de chantier : fabrication, transport, mise en œuvre des matériaux et équipements ;
- phase d'exploitation : modification de la consommation (énergie, eau, déchets) ;
- phase de démolition : traitement en fin de vie pour les matériaux et équipements produits pour la réhabilitation.

Le renouvellement des capacités et des infrastructures est également pris en compte car il peut être considéré comme une conséquence de l'utilisation des infrastructures.

Extension du périmètre initial pour l'ACVC

Les extensions des frontières du système concernent principalement des cas d'export de matériaux (recyclage) et d'export d'énergie (électricité vers le réseau). Ces flux doivent être inclus dans les frontières du système car ils représentent des conséquences de la décision prise.

Particularité ACVC : Prise en compte de la consommation d'électricité spécifique

Si l'on effectue l'étude selon une approche conséquentielle – ce qui est recommandé pour répondre à un objectif d'écoconception - on peut questionner le fait d'intégrer ou non l'électricité spécifique (consommation d'électricité des appareils informatiques et électroménagers, hors éclairage). En effet, cette consommation peut être considérée comme la conséquence du développement de l'activité économique ou de la démographie et non une conséquence de la construction du bâtiment. La chaîne de conséquence serait la suivante : démographie et activité économique engendrent des consommations d'électricité spécifiques supplémentaires et un besoin en bâtiment (le renouvellement du parc bâti étant inférieur à 1 %). La construction d'un bâtiment engendre, elle, de nouveaux espaces à chauffer, à climatiser, à éclairer.

La question peut se poser de façon identique pour la consommation d'eau chaude sanitaire. Cependant, le fait d'installer des panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques permet de diminuer la consommation en énergie (électricité ou autre). Cette décision est le fait du concepteur du bâtiment. Afin de respecter la philosophie de l'approche conséquentielle, qui consiste à intégrer seulement les flux affectés par la décision prise, il est possible d'intégrer dans les frontières du système la différence entre un système de référence

(consommation d'électricité, d'ECS moyenne) et le système installé : part de la consommation électrique évitée par les panneaux solaires photovoltaïques ou thermiques, impact de la production, rénovation et fin de vie des systèmes solaires installés.

Après avoir défini les frontières, on cherche à déterminer quels sont les procédés impactés, ou la technologie marginale de production, afin de réaliser l'inventaire de production.

1.2.6.4. INVENTAIRE : TECHNOLOGIES MARGINALES DE PRODUCTION

En ACVA, les technologies et procédés moyens de production vont être utilisés pour réaliser l'inventaire de production (p. ex. mix moyen de production d'électricité). En ACVC, il est important de déterminer si des contraintes de production existent. La première étape est la détermination des technologies marginales de production.

Les produits et systèmes liés à la réalisation du programme sont classés en trois grandes familles dans le Tableau 5. Si aucune contrainte de production n'existe, alors la technologie marginale et la technologie moyenne sont identiques.

Tableau 5 : Classification des produits et systèmes liés aux ensembles bâtis

Infrastructures locales et environnement proche	Infrastructures nationales	Matériaux et équipements
<ul style="list-style-type: none"> • Réseaux d'eau (potable/usées) • Gestion des déchets ménagers • Transports des occupants • Réseaux de chaleur urbains • Masques 	<ul style="list-style-type: none"> • Système électrique • Autres filières énergétiques (gaz, fioul, bois) 	<ul style="list-style-type: none"> • Matériaux de construction (fabrication/fin de vie) • Menuiseries, revêtements (fabrication/fin de vie) • Équipements et systèmes (chaudière, panneaux solaires...) (fabrication/fin de vie)

Infrastructures locales

Le cas des infrastructures locales dépend du contexte du projet. Les conséquences suivantes peuvent être anticipées :

- Effets de seuil, dépassements de la capacité des équipements municipaux (traitements des déchets, réseaux de chaleur urbains) impliquant l'installation de nouvelles capacités.
- Conséquences locales sur le réseau de transport de l'implantation d'un nouveau quartier (par exemple augmentation du trafic, augmentation de la congestion). Ces effets complexes peuvent être déterminés grâce à des outils dédiés (Leurent et Boujnah, 2014).
- Modification marginale du fonctionnement du réseau de chaleur urbain. Influence sur l'installation de nouvelles capacités.

- Modification marginale du fonctionnement du réseau d'eau (eau potable ou eaux usées). Influence sur l'installation de nouvelles capacités.
- Effets de masques : on étudie généralement l'effet des masques portés par les bâtiments environnants sur le bâtiment/quartiers projetés. Cependant, la réalisation du bâtiment/quartier peut elle-même engendrer des masques sur les bâtiments environnants. Ces effets ne sont généralement pas inclus en ACVA.

Les modifications marginales du fonctionnement des réseaux diffèrent d'une méthode moyenne en particulier si plusieurs technologies sont en compétition sur le réseau, p. ex. réseau de chaleur urbain multi-énergies, sources variées d'approvisionnement en eau (nappes souterraines ou de surface). Dans chaque cas, la technologie la moins chère encore disponible sera la technologie marginale.

Les effets locaux sont examinés au cas par cas en fonction de l'analyse du contexte local et des informations disponibles. Des effets supplémentaires peuvent être introduits, par exemple modification des pertes sur le réseau de chaleur, si un accès à une modélisation fine du fonctionnement du réseau est disponible.

Matériaux et équipements

De récents développements des bases de données environnementales, commeecoinvent v3 (Weidema et al., 2013) basés sur les précédents travaux de Weidema (2003), intègrent les principes de modélisation de l'ACV conséquentielle (exclusion des technologies contraintes et expansion du système). Ils pourraient être intégrés aux outils d'écoconception des ensembles bâtis afin de traiter la partie concernant les matériaux et équipements. Les principaux résultats et hypothèses sur les domaines concernant directement les bâtiments et les quartiers sont résumés ci-après :

- Sur un marché en expansion, la disponibilité des matériaux recyclés est contrainte (voir Weidema 2003 p. 99). Cela implique de n'accorder aucun crédit (impacts évités) lors de l'utilisation de matériaux recyclés. En effet, seule une augmentation de la quantité de matière à recycler permet d'augmenter la production de matériaux recyclés, ce qui impliquerait au niveau des ensembles bâtis de tenir compte uniquement du recyclage en sortie (surplus chantier, remplacement et démolition). Cela concerne notamment le cas des métaux (acier, cuivre, aluminium) et les papiers/cartons.
- À l'inverse, sur un marché en déclin, seul le recyclage en entrée est valorisé, l'envoi de matière vers le recyclage ayant pour conséquence une augmentation des quantités à traiter en décharge.
- Les marchés liés au bois (bois-énergie, bois de construction) sont considérés comme non-contraints dans les résultats de Weidema.
- Les contraintes éventuelles sur la production de ciment et de béton sont à évaluer au niveau local. La disponibilité en cendres volantes, entrant dans la composition de certains ciments, peut éventuellement être contrainte.

L'étude de Vieira et Horvath (2008) sur la fin de vie des bâtiments conclut qu'il y a une différence non significative entre ACVA et ACVC, ce qui est en contradiction avec les

résultats de Buyle et al. (2014) pour lequel la fin de vie des bâtiments est influencée de façon importante par le choix d'une approche ACVA ou ACVC. Dans leur étude sur les matériaux de construction, Sandin et al. concluent que le choix de l'approche (ACVA ou ACVC), n'influence pas les performances relatives des matériaux (Sandin et al., 2013). Il semble donc difficile d'apporter une conclusion générale sur l'influence du choix de la méthode concernant l'étude des matériaux de construction.

L'approche ACVC semble affecter principalement le cas des métaux, en particulier l'acier et l'aluminium, qui sont fréquemment utilisés dans le secteur de la construction et peuvent être entièrement recyclés. Une étude ACV récente sur les armatures en acier utilisées dans le secteur de la construction en France indique « une croissance limitée du secteur de la construction autorisant un fort pourcentage de matière recyclée dans les produits utilisés » (Gomes et al., 2013). Cela paraît contradictoire avec les recommandations de Weidema qui ne valorise que le recyclage en sortie pour un marché stable ou en croissance. Concernant l'aluminium, Frees (2007) recommande que seule la mise au recyclage de l'aluminium soit valorisée en ACV conséquentielle et non l'utilisation de matières recyclées, ce qui correspond aux recommandations de Weidema.

Concernant le bois de construction, il n'y a pas de contraintes de marché recensées dans les travaux de Weidema. Cependant, des conséquences indirectes néfastes, comme la déforestation, peuvent être imputées à l'utilisation du bois si celui-ci ne provient pas de forêts gérées durablement. Le bois issu de forêts durables permet au contraire de stocker du carbone (Lippke et al., 2011). Deux types de méthodes existent pour la prise en compte du carbone biogénique en ACV :

- Bilan nul : La fixation du carbone durant la croissance végétale et la libération du carbone biogénique en cas d'incinération peuvent être exclues du comptage des émissions de CO₂, en considérant que ce qui a été stocké sera émis plus tard.
- Bilan différencié : Plusieurs chercheurs préconisent plutôt un traitement différencié du carbone biogénique selon les différentes phases du cycle de vie (Guinée et al., 2009 ; Rabl et al., 2007). Cela permet de tenir compte de la provenance du bois (forêt gérée durablement ou non) et des différentes options de fin de vie (décharge, valorisation énergétique ou matière...). C'est l'approche retenue dans Polster (1995).

Cette deuxième méthode est cohérente avec une approche conséquentielle car elle intègre des conséquences potentielles (déforestation) induites par la décision prise et permet de comptabiliser des impacts évités en fin de vie. Elle est également une condition nécessaire au développement d'une modélisation dynamique du stockage et déstockage de carbone, comme préconisée par Levasseur et al. (2013). Cette approche est donc reprise dans le cadre de cette thèse.

Infrastructures nationales : combustibles gaz, fioul et bois

L'étude des équipements inclut de façon indirecte l'étude des combustibles grâce auxquels ils fonctionnent, par exemple le gaz, le fioul ou le bois. L'essor des ressources fossiles non conventionnelles (p. ex. gaz et pétrole de schiste) a bouleversé récemment les marchés

de l'énergie. Les travaux de Mohr et Evans (2011) projettent un pic de production pour les ressources de gaz conventionnelles entre 2019 et 2066, beaucoup plus précoce que pour les ressources non conventionnelles, ce qui penche pour une approche considérant à moyen terme une substitution du gaz conventionnel par des sources non conventionnelles.

Cette approche est difficile à réaliser en pratique pour trois raisons principales. D'abord les études environnementales sur les sources de gaz non conventionnelles sont aujourd'hui peu nombreuses. Ensuite, elles donnent des résultats contradictoires (Howarth et al., 2011 ; Burnham et al., 2012). Enfin, les inventaires ne sont pas disponibles dans les bases de données génériques comme ecoinvent, ce qui empêche de garantir une homogénéité méthodologique avec le traitement des autres données.

Concernant la consommation de bois de chauffage, aucune étude ne mentionne d'éventuelles non-linéarités du marché. Une approche homogène à celle des matériaux de construction (Rabl et al., 2007) est retenue. La technologie marginale de production est considérée comme équivalente à la technologie moyenne.

Infrastructures nationales : système électrique

Plusieurs auteurs, dont Weidema et al. (2009), considèrent que la détermination des technologies marginales doit s'effectuer sur le long terme, les effets induits étant plus persistants que les effets de court terme. Le cas des monopoles et des marchés régulés fait exception car la situation du marché (i. e. la compétitivité des technologies existantes) a moins d'influence sur l'ajustement des capacités. Une technologie, même peu compétitive, peut être soutenue par des politiques publiques (par exemple contrat d'achat pour les énergies renouvelables), des mécanismes de quotas (par exemple quotas de CO₂) peuvent être mis en place ainsi que des objectifs politiques (par exemple maximum de 50 % de l'électricité produite par le secteur nucléaire en 2025). L'ajustement des capacités ne peut plus être considéré comme guidé par la compétitivité des différentes technologies.

Ce cas correspond à la production française d'électricité. D'abord, 90 % de l'électricité produite en France provient de l'entreprise EDF (chiffres MEDDEE 2014). L'ensemble du marché est de plus contrôlé par la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE). La décision d'investissement dans de nouvelles capacités de production est intimement liée à la politique, notamment en ce qui concerne le parc nucléaire. La capacité installée des énergies renouvelables est enfin fortement liée aux mécanismes incitatifs mis en place par les pouvoirs publics (p. ex. contrat d'obligation d'achat, Fond Chaleur de l'ADEME). Les effets marginaux de court terme ne peuvent donc pas être négligés.

L'utilité de l'évaluation de la technologie marginale à court terme pour la production d'électricité a été soulignée récemment dans une étude portant sur le déploiement des productions décentralisées dans le contexte québécois (Amor et al., 2014). Le cas de l'évaluation des impacts évités par la production décentralisée provenant des bâtiments dans le cadre de l'aide à la conception correspond au cas d'application mentionné dans cette étude.

Prise en compte des effets rebond

Déterminer quelle technologie va répondre à la variation de demande induite par le projet n'est pas nécessairement suffisant. D'autres effets socio-économiques peuvent intervenir introduisant une non-linéarité entre la demande et la production résultante. Ces effets sont regroupés sous le terme générique d' « effet-rebond ».

L'effet rebond peut être défini comme « l'augmentation/la diminution de consommation liée à la réduction/l'augmentation des limites à l'utilisation d'une technologie, ces limites pouvant être monétaires, temporelles, sociales, physiques, liées à l'effort, au danger, à l'organisation... » (Schneider, 2003). Les différents types d'effets rebond sont généralement classés en deux catégories (Hertwich, 2008) :

- Les effets microéconomiques : directs (la demande pour le même service augmente car le prix est plus bas) ou indirects (la demande pour d'autres services augmente en raison d'un réinvestissement du gain financier). Ces effets ont principalement été étudiés pour le cas des services énergétiques.
- Les effets macroéconomiques : effets d'élasticité (variations de la demande ou de la production de différents secteurs économiques liées à une variation des prix), effets « transformationnels » (préférence sociétale pour une technologie, adoption de nouveaux comportements, transition de l'ensemble de la société). Les effets rebond transformationnels peuvent être assimilés aux conséquences de 3^{ème} ordre de l'ACVC.

Un exemple d'effet micro-économique direct observé dans les bâtiments concerne la consommation d'énergie pour le chauffage suite à une opération de réhabilitation. Une partie des économies d'énergie prévues n'est pas réalisée car les occupants ont augmenté leur confort (p. ex. température de consigne). Une étude faite en Autriche donne un ordre de grandeur de consommation supplémentaire de 20 à 30 % pour l'effet-rebond sur le chauffage (Haas et Biermayr, 2000). De manière plus générale, toute économie peut entraîner un effet rebond direct ou indirect (Hertwich, 2008), en particulier les économies d'énergie (A. Greening et al., 2000). Des études de sensibilité sur la température de consigne permettent de tenir compte de cet effet en analyse du cycle de vie des bâtiments et des quartiers. Plus généralement, il est important dans le cadre de l'écoconception des ensembles bâtis d'évaluer les impacts environnementaux d'un projet en tenant compte d'un comportement réaliste des occupants qui peut être éloigné des scénarios conventionnels ou normatifs (voir (Vorger, 2014)).

L'évaluation des effets macroéconomiques nécessite le support de modèles économiques comme les modèles d'équilibre général. À l'échelle d'un projet, l'amplitude des conséquences vis-à-vis des marchés économiques va rester faible (p. ex. quantité de métaux consommée par rapport au marché des métaux). Les effets macro-économiques (p. ex. effets sur le prix des matières premières) peuvent être négligés (Weidema et al., 2009 ; Guiton et Benetto, 2013).

L'ACVC appliquée au niveau micro-économique sans le soutien d'un modèle d'équilibre général modélisant les répercussions sur l'ensemble des autres secteurs économiques est aussi appelée ACV décisionnelle par Frischnecht et Stucki (2010).

Prise en compte des effets dits de « 3^{ème} ordre »

Les effets de 3^{ème} ordre concernent des changements sociologiques, de démocratisation des technologies innovantes renforcés ou inhibés par la décision prise. Ils sont très difficiles à modéliser et sont peu étudiés en ACVC (Dandres, 2012). Ainsi, certains chercheurs estiment que le développement des compteurs intelligents et de la production décentralisée peut influencer le comportement des occupants des bâtiments et engendrer des économies d'énergies (Wolsink, 2012).

Il est possible d'appliquer le principe de précaution en considérant que ces effets ne se produisent pas. Les effets des économies d'échelle sont généralement positifs sur le bilan environnemental d'une technologie, l'hypothèse négligeant ces effets peut être vue comme conservative.

Conclusion

L'approche proposée se focalise donc sur les conséquences de premier et de second ordre micro-économique (technologies marginales de production) pour réaliser l'inventaire de production. Les effets de 2^{ème} ordre macro-économique (effet rebond, élasticité) et les effets de 3^{ème} ordre sont jugés négligeables ou non modélisables à l'échelle d'un projet d'écoconception. L'étude de ces effets est cependant une perspective de recherche intéressante à l'échelle du parc bâti.

Parmi les conséquences incluses, certaines nécessitent une analyse du projet au cas par cas, comme les effets sur les infrastructures locales. La problématique de la production d'électricité peut être généralisée, cependant elle implique un effort de modélisation supplémentaire. Le cas de l'électricité est donc développé plus en détail dans le paragraphe suivant et constitue une part importante des travaux présentés dans cette thèse. Les effets rebond microéconomiques peuvent être intégrés sous la forme d'étude de sensibilité : augmentation de la température de consigne par exemple.

1.2.7. L'électricité et le parc bâti

Le secteur résidentiel-tertiaire consomme en France plus de 60 % de l'électricité produite (environ 32 % pour le secteur résidentiel et 29 % pour le secteur tertiaire en 2011 (ADEME, 2012). Cette consommation a connu une hausse constante depuis les années 1990, de 3,3 % en moyenne¹¹, et connaît actuellement une relative stabilisation liée au contexte de crise économique.

La progression récente de la consommation du secteur résidentiel est notamment liée au développement soutenu du chauffage électrique, même si la nouvelle réglementation

¹¹ <http://www.observatoire-electricite.fr/Consommation-finale-d-electricite-52>

thermique (RT2012) est moins favorable à ce type de chauffage (on est passé d'un taux de pénétration de 73 % dans les constructions neuves à 40 % entre 2008 et 2012) (RTE, 2013a, p. 8). Cette hausse est également une conséquence du développement de nouveaux usages (par exemple les TIC : Technologies de l'Information et de la Communication). Dans le secteur tertiaire, l'essor de l'économie des services a généré une multiplication des espaces fournis en TIC, chauffés et climatisés à l'électricité.

Ces deux secteurs constituent donc le principal moteur de la demande en électricité et la principale source de variabilité de cette demande : saisonnalité du chauffage et de la climatisation, variation hebdomadaire des usages professionnels, et forte variation horaire des usages résidentiels quotidiens et de l'éclairage. La thermo-sensibilité de la demande, conséquence directe du chauffage électrique, est un des aléas majeur du système et impose un surdimensionnement important du parc de production : en février 2012, « On estime que 40 % de la consommation d'électricité appelée durant cette vague de froid est le fait du chauffage électrique »¹².

Le développement de bâtiments à énergie positive génère parallèlement une production locale, également intermittente, allant du parc bâti vers le réseau électrique (Sartori et al., 2012). L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments, la progression des offres d'effacement diffus et des concepts de *smart-grids* ou de *smart-buildings* renforcent les possibilités de contrôle de la courbe de charge des bâtiments (Favre et Peuportier, 2014 ; Zheng et al., 2015 ; Hurtado et al., 2015).

De l'autre côté du réseau, la production s'organise autour d'une grande variété de technologies : des centrales nucléaires aux systèmes photovoltaïques résidentiels en passant par les centrales thermiques fossiles, les éoliennes, l'hydroélectricité ou encore la production thermique décentralisée (cogénération, incinérateur de déchets, etc.). Elles peuvent être modulables ou fatales, varier avec les saisons, être coûteuses ou bon marché, avoir des impacts environnementaux de différents types (toxicité, climat), à différentes échelles (locale, régionale, planétaire). De nombreux travaux sont disponibles concernant l'évaluation des impacts environnementaux de la production d'électricité, en particulier concernant les émissions de gaz à effet de serre (Soimakallio et al., 2011 ; Turconi et al., 2013 ; Sovacool, 2008 ; Fthenakis et Kim, 2007).

Les revues de Sharma et al. (2011) et Cabeza et al. (2014) montrent la diversité des études ACV faites sur les bâtiments et soulignent l'importance de la consommation d'énergie, voire plus spécifiquement de l'électricité dans le bilan final. L'utilisation de la simulation thermique dynamique pour évaluer précisément les liens entre les matériaux choisis et la consommation d'énergie est mentionnée. Toutefois, on ne trouve pas d'information sur la façon de modéliser les impacts de l'électricité. La plupart du temps, ceux-ci sont évalués en utilisant les données de mix annuel moyen d'une année passée du pays concerné, en utilisant par exemple ecoinvent (Itten et al., 2012). La représentativité géographique des données de mix est parfois discutée au moyen d'études de sensibilité (Citherlet et Defaux, 2007), certains aspects

¹² Op.cit, p8

prospectifs également (Fouquet et al., 2015). La variation temporelle de la production n'est pas prise en compte, sauf dans Herfray (2011a).

La problématique de la variation horaire de la production d'électricité et la détermination de technologies marginales de production d'électricité sont cependant présentes dans des études portant sur les véhicules électriques (Raichur et al., 2015), les serveurs informatiques (Vandromme, 2014) et la production d'électricité décentralisée (Amor et al., 2014).

Ces études dans différents secteurs mettent en relief l'importance de la prise en compte des variations temporelles de la production électrique et les écarts significatifs obtenus entre les approches moyennes et les approches marginales, caractéristiques des approches attributionnelles et conséquentielles. La prise en compte des interactions entre le parc bâti et le système électrique dans l'analyse du cycle de vie des bâtiments et des quartiers semble être une voie importante d'amélioration des outils d'écoconception.

1.2.8. Discussion et conclusion

Lors de l'utilisation d'analyse de cycle de vie en phase avant-projet (écoconception), le projet est par définition non réalisé. L'ajout d'un nouveau quartier, l'action de réhabilitation sur un quartier existant procède donc d'une décision et impacte l'existant. Ce cadre peut être opposé au cadre normatif de la certification des bâtiments, où le bâti évalué est déjà réalisé. D'après Plevin et al. (2014), l'utilisation de l'ACVA n'est pas pertinente pour un objectif d'aide à la décision et correspond plutôt à des objectifs normatifs.

L'ACVC semble plus appropriée dans le cadre de l'utilisation de l'ACV pour l'écoconception des ensembles bâtis. Plusieurs hypothèses de modélisation déjà utilisées correspondent à cette approche : méthode des impacts évités, prise en compte différenciée du carbone biogénique. Des travaux scientifiques existants nous permettent déjà de déterminer des technologies marginales de production pour les matériaux de construction. Les conséquences concernant les infrastructures locales doivent être étudiées au cas par cas.

Pour Suh et Yang (2014), il n'y a pas de frontières bien délimitées entre ACVA et ACVC, mais plutôt des études d'ACV introduisant des approches complémentaires (données ou modèles économiques, scénarios, changement d'affectation des sols, dynamique des systèmes etc.) afin d'améliorer le réalisme de l'évaluation environnementale. Les auteurs soulignent aussi qu'une ACVC « complète » n'existe pas puisqu'il est impossible de modéliser exhaustivement l'ensemble des conséquences d'une décision.

Dans le cadre d'un atelier en mars 2012¹³, Heijungs et Guinée ont présenté la différence importante de point de vue entre les deux méthodes, comme présentée sur la Figure 5. L'ACVA cherche à allouer à un produit donné une fraction des impacts totaux. L'ACVC cherche à modéliser la manière dont les impacts vont être modifiés par une modification marginale du système (production supplémentaire d'une unité de produit). Les deux

¹³ [ATA EcoSD 2013 ACV conséquentielle : 21 mars 2013 -Paris-](#)

méthodes peuvent être équivalentes dans certains cas. Par exemple, une usine fabriquant un produit A avec une seule technologie, sur un marché non contraint. Si cette technologie peut augmenter sa production, alors une unité supplémentaire de produit A sera produite par cette technologie. En ACVA, c'est bien à partir de cette même technologie que seront évalués les impacts environnementaux liés à la production de A.

Il est important de définir si l'objectif de l'étude impose un point de vue « conséquentiel ». Ensuite, en pratique, une modélisation « attributionnelle » peut être vue comme une première approximation d'une question conséquentielle.

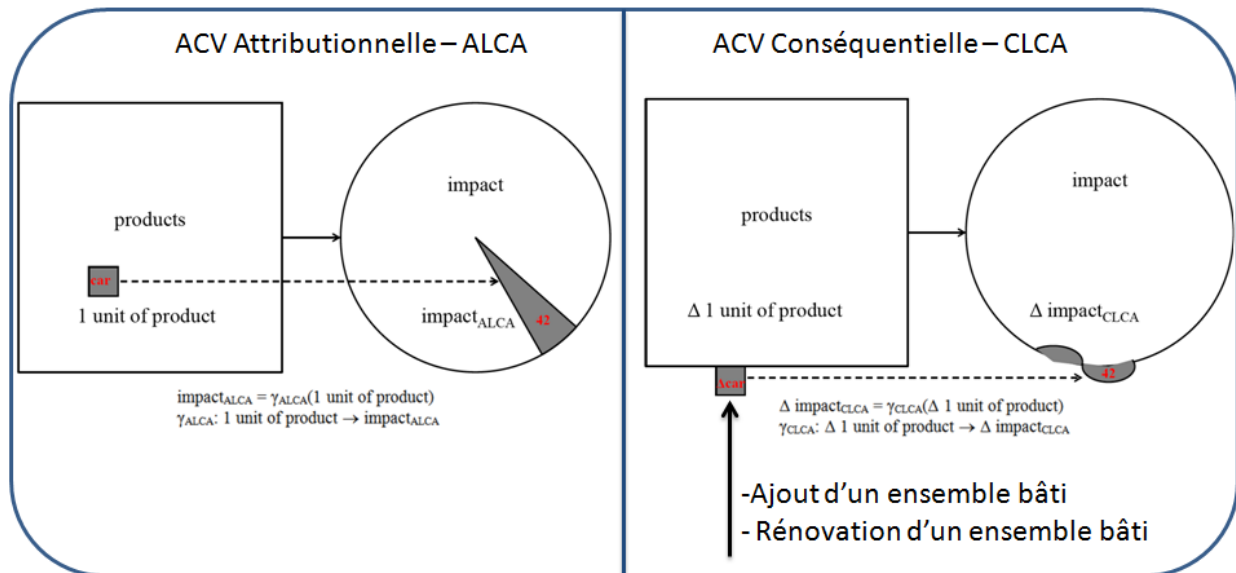


Figure 5 : ACVA (gauche) et ACVC, adapté de Weidema (2003)

La question de l'électricité et du mix électrique est complexe et impose un effort de modélisation supplémentaire. Cette modélisation doit tenir compte des effets de court terme qui ne peuvent être négligés. Les variations horaires de la production électrique étant importantes, une modélisation dynamique est nécessaire.

Les ensembles bâtis ont une durée de vie longue et leur consommation d'énergie en phase d'utilisation est un contributeur très important au bilan environnemental. Le système électrique est également amené à varier fortement sur la durée de vie d'un ensemble bâti, ce qui implique d'intégrer une dimension prospective à l'étude. De plus, de nombreux chercheurs insistent sur la nécessité d'étudier les effets de long terme dans le cadre d'une analyse conséquentielle.

Les paragraphes suivants présentent un état de l'art sur l'ACV dynamique et l'ACV prospective. Ces développements de la méthodologie ACV sont nécessaires pour l'ACVC mais peuvent également contribuer à l'amélioration de l'ACVA. Ils représentent des thèmes à part entière de la recherche en ACV.

1.3. LA QUESTION TEMPORELLE EN ANALYSE DE CYCLE DE VIE

La prise en compte des aspects temporels en analyse du cycle de vie a conduit à développer la méthode d'ACV dynamique. Ce terme peut être employé soit concernant la modélisation du système étudié et l'inventaire qui en découle, soit concernant une variabilité temporelle des impacts environnementaux des différentes émissions dans le temps (Beloin-Saint-Pierre, 2012).

L'ACV dynamique est définie par Collinge et al. (2013) comme une approche de l'ACV qui intègre explicitement de la modélisation dynamique. Le cadre formalisé par Collinge peut être appliqué à l'approche attributionnelle ou conséquentielle, et intègre une considération temporelle dans l'ensemble de la méthodologie ACV (figure 2 ci-dessous).

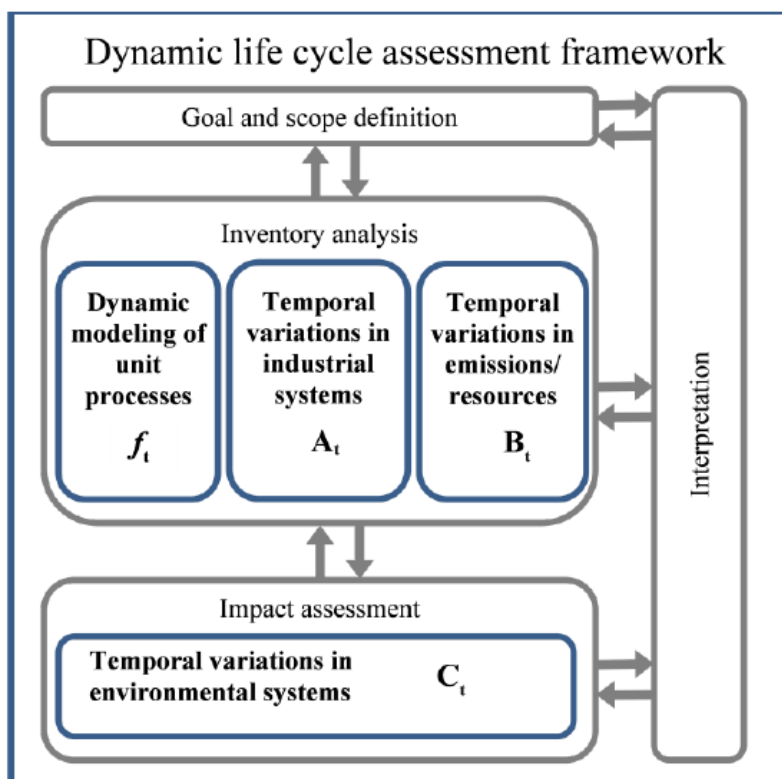


Figure 6 : Diagramme conceptuel de l'ACV dynamique, extrait de Collinge et al. 2013

L'approche dynamique peut concerner des échelles de temps plus ou moins longues (variation du système sur une année, ou sur un horizon de plusieurs dizaine d'années), et différents pas de temps peuvent être considérés dans la modélisation (p. ex. 1 heure, 1 an).

1.3.1. Variation temporelle de l'inventaire

Plusieurs paramètres influençant l'élaboration de l'inventaire peuvent varier en fonction du temps : les procédés unitaires du système étudié, la configuration technologique des systèmes industriels d'arrière-plan ainsi que les émissions et les ressources nécessaires par unité de procédé technologique.

Plusieurs paramètres du vecteur f , dont les éléments f_i représentent la quantité nécessaire de produit i pour la réalisation de l'unité fonctionnelle du système étudié, peuvent être représentés comme une fonction du temps. Par exemple dans le cas d'un bâtiment, le besoin en énergie pour le chauffage varie selon les heures, les jours et les saisons. Il varie également d'année en année : le vieillissement du bâtiment diminue ses performances thermiques ; une rénovation peut les améliorer. Les besoins en électricité spécifique varient également sur différents pas de temps (p. ex. heures, jours) et peuvent aussi évoluer au cours des années (p. ex. remplacement des ampoules à incandescence par les ampoules à basse consommation, appareils électroménager et bureautiques plus performants, voire évolution de la consommation électrique due à l'augmentation des prix).

Concernant les matériaux et les systèmes, plusieurs ont des durées de vie inférieures à la durée de vie du bâtiment et doivent donc être remplacés (p. ex. revêtements, menuiseries, chaudière). Ceci peut donc également donner lieu à un séquençage temporel (Rivallain, 2013).

La matrice représentant le système technologique d'arrière-plan est noté A dans la formulation matricielle de l'analyse de cycle de vie. Cette matrice inclut par exemple la représentation du mix électrique, les infrastructures de gestion des déchets, la chaîne de production gazière, etc. Le coefficient a_{ij} représente la quantité nécessaire issue du processus i pour produire une unité issue du processus j . La colonne j représente donc la composition, la « recette » de fabrication d'une unité de produit j .

Comme expliqué par Jolliet et al. (2010), la quantité totale X de produits (x_i) générée par une demande Y de produits (y_i) peut s'exprimer par une suite mathématique. $A \times Y$ représente la production indirecte de 1^{er} ordre du système technologique nécessaire pour produire Y . En effet, pour produire le matériau y_1 entrant dans la composition de Y , il a fallu produire l'ensemble des composants de la colonne de A correspondant au produit y_1 (la « recette » de y_1), par exemple électricité, transport, chaleur, matériaux intermédiaires... De même, $A \times (A \times Y)$ représente la demande en production indirecte sur le système technologique pour produire le vecteur demande résultant de $A \times Y$... On a donc :

$$X = (I + A + A^2 + A^3 \dots) \times Y \quad 1-2$$

où l'on peut reconnaître la suite mathématique : $\sum_{n=0}^{+\infty} A^n = (I - A)^{-1}$

$$\text{soit } X = LY \text{ avec } L = (I - A)^{-1} \quad 1-3$$

Les coefficients l_{ij} de la matrice L représentent la quantité totale de produit i qui sera générée par la production d'une unité de j . Elle inclut la consommation intermédiaire du système technologique nécessaire pour satisfaire la demande : au contraire de la matrice A ,

elle tient compte des interactions entre les secteurs économiques, des productions indirectes provenant de processus utilisés au 2^e, 3^e niveau, etc. : « la machine qui a fabriqué la machine qui a permis de produire l'intrant de l'inventaire de production » (Jolliet et al., 2010).

Remplacer la matrice A par une matrice $A(t)$, fonction du temps peut être, de façon analogue au vecteur f , effectué sur deux échelles de temps : court terme ou long terme. À court terme, il s'agit de rendre compte de variations temporelles à des échelles inférieures à l'année (saisonnière, hebdomadaire, horaire...). Un exemple est le système électrique, dont les filières de production varient dans le mix en fonction de la saison, du jour et même de l'heure considérée. À long terme, il s'agit de prendre en compte l'évolution des procédés technologiques : changement dans les capacités installées (p. ex. remplacement des centrales au charbon par des centrales au gaz, développement de la filière recyclage pour la production d'acier), intégration de nouvelles technologies (p. ex. recyclage des panneaux photovoltaïques, gaz de schistes), amélioration de l'efficacité des systèmes et des infrastructures (p. ex. amélioration du taux de recyclage interne, efficacité énergétique des moyens de production, diminution des pertes). Cette vision à long terme aborde les enjeux prospectifs qui sont développés dans le Chapitre 4.

Le dernier paramètre qui peut évoluer en fonction du temps, et ainsi impacter l'inventaire de cycle de vie est la matrice B . Ses coefficients b_{ij} représentent l'émission de substance i (ou la consommation de ressource i) par unité de production d'un processus j . Par exemple, quelle quantité de SO_2 sera émise par la production d'un kilowattheure d'électricité par une centrale à charbon ?

Les coefficients de cette matrice peuvent évoluer notamment en raison de réglementations sur les émissions (p. ex. réglementation européenne sur les émissions de CO_2 des véhicules neufs), de quotas (p. ex. marché du CO_2), de taxes, de l'interdiction puis de la substitution de certaines substances (p. ex. Protocole de Montréal), de la mise en place de systèmes de dépollution dans les usines (p. ex. filtres sur les cheminées, traitement des effluents).

Certaines études d'ACV dynamique se basent sur un modèle d'évolution du système, des technologies, et donc de l'inventaire qui en découle, soit avec une optique de variation à court terme (Peuportier et Herfray 2012 ; Collinge et al. 2011), soit à long terme (Pehnt, 2006). D'autres choisissent de considérer plus spécifiquement les facteurs de caractérisation des impacts, comme présenté dans le paragraphe suivant.

1.3.2. Variation temporelle des facteurs d'impacts

Après avoir effectué l'inventaire de cycle de vie, les différentes substances et ressources listées sont agrégées sous forme d'indicateurs environnementaux grâce à des facteurs de caractérisation. Ceux-ci permettent de prendre en compte différentes substances sur une même base, relativement à un problème environnemental spécifique.

On évalue par exemple l'impact sur le changement climatique par l'intermédiaire du forçage radiatif cumulé des différents gaz rapportés à celui du dioxyde de carbone, sur une durée donnée (nous considérons 100 ans). Les équivalents CO₂ générés sont ainsi sommés pour donner l'impact « Potentiel de réchauffement global » (PRG) total. Le PRG d'une substance *i* est donné par la formule suivante issu de Solomon (2007):

$$PRG_i = \frac{\int_0^T a_i \times c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} \times c_{CO_2}(t) dt} \quad 1-4$$

Un facteur de caractérisation comme le PRG d'un gaz (i.e. combien de kg équivalent CO₂ il représente) est lié à des variations temporelles puisque la concentration du gaz varie dans le temps (dégradation, durée de vie du gaz dans l'atmosphère). La critique principale sur ce type d'évaluation de l'impact du gaz vient du fait qu'on ne prend pas en compte le moment où l'émission se produit, ce qui peut poser problème, notamment lors de la prise en compte du carbone biogénique (Kendall, 2012). En effet, il y a alors une incohérence entre la durée d'analyse considérée dans l'inventaire et celle utilisée pour la caractérisation des impacts, comme illustré par la Figure 7, extraite de Levasseur et al. (2010).

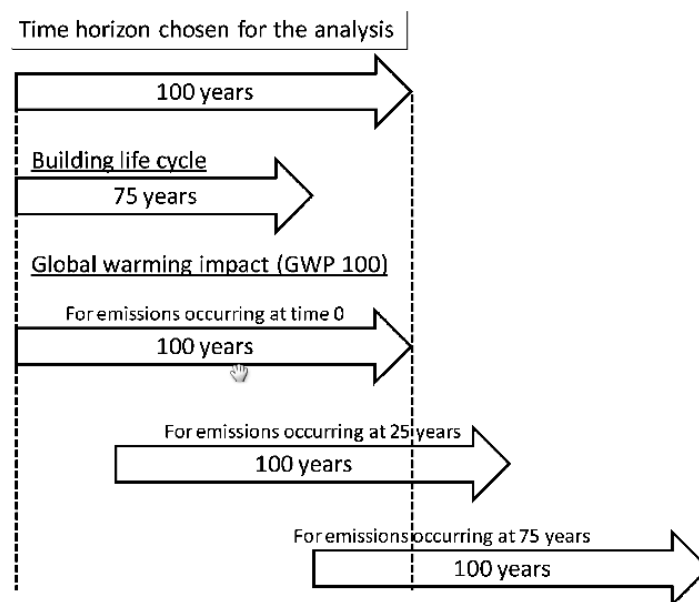


Figure 7 : Incohérence du cadre temporel en ACV statique (Source : Levasseur et al.).

Cela conduit à la définition de facteurs de caractérisation variables au cours du temps. Cette démarche est indissociable de la réalisation d'un inventaire dynamique, tenant compte du moment d'émission. Les résultats présentés sur le thème du carbone biogénique dans la littérature scientifique montrent que l'interprétation des résultats d'une ACV peut être

remise en question par la prise en compte de cette dynamique. Cependant, on retrouve des résultats similaires entre un calcul utilisant des facteurs de caractérisation variables et un calcul avec des facteurs fixes en considérant une durée d'analyse longue pour le PRG (500 ans), voir notamment les récents travaux de Levasseur et al. (2013).

Shah et Ries (2009) ont également montré l'importance de l'introduction de facteurs de caractérisation mensuels pour le calcul du potentiel de production d'ozone photochimique, à cause notamment des températures plus élevées et de l'irradiation plus importante en période estivale. Les facteurs de caractérisation hivernaux sont de deux ordres de grandeur plus faibles que les facteurs estivaux. Les travaux de Van Zelm et al. (2007) ont également montré l'importance de l'horizon temporel considéré pour le calcul du potentiel d'acidification, en proposant une méthode orientée dommage pour caractériser les effets de l'acidification sur les forêts européennes.

Le développement d'indicateurs et de facteurs d'impacts précis et robustes est un des axes de recherche les plus actifs en analyse de cycle de vie. Au fur et à mesure des années, de plus en plus de données sont disponibles. Cependant, l'implémentation de ces méthodes reste conditionnelle à l'obtention de données de précision équivalente concernant la description du système étudié et de son arrière-plan, ce qui pose d'importantes difficultés méthodologiques (Beloin-Saint-Pierre, 2012). En pratique, l'utilisation de ces nouvelles méthodes est aujourd'hui limitée au système étudié car elles ne sont généralement pas intégrées dans les bases de données.

1.3.3. Conclusion

La prise en compte des variations temporelles en ACV, appelée aussi « ACV dynamique » est un récent développement de la méthode introduisant plus de détails et de précision à tous les niveaux de la modélisation (système étudié, représentation technologique, substances émises, caractérisation des impacts). Elle peut être appliquée à une approche attributionnelle ou conséquentielle, et peut être déployée tant sur un horizon à court terme qu'au niveau de scénarios d'évolution sur le long terme.

L'introduction de nouveaux mécanismes (économiques, technico-économiques) par l'approche conséquentielle nécessite plus d'informations sur le système étudié et son environnement, informations qui peuvent être obtenues en partie grâce à l'ACV dynamique. L'approche conséquentielle est ainsi régulièrement associée à l'ACV « dynamique » (Stasinopoulos et al., 2012).

1.4. ENJEUX PROSPECTIFS

1.4.1. Introduction

La prospective est une démarche à part entière, une attitude d'anticipation qui n'est ni une prolongation des tendances actuelles, ni une prédiction du futur. Selon G. Berger : « *La Prospective n'est ni une doctrine, ni un système. Elle est une réflexion sur l'avenir, qui s'applique à en décrire les structures les plus générales et qui voudrait dégager les éléments d'une méthode applicable à notre monde en accélération.* » (Berger et al., 2007).

De la fin de la seconde guerre mondiale au premier choc pétrolier de 1973, l'économie resta relativement stable. La planification stratégique, ancêtre de la prospective, reposait le plus souvent sur l'extrapolation des tendances passées. La modélisation prospective se développe dans les années 1970 suite au premier exercice du Club de Rome sur le thème de la croissance (Meadows et al., 2004). L'étude des effets du progrès, l'impact de la raréfaction des ressources (crises pétrolières) et plus récemment la question climatique engendrent la création d'équipes de chercheurs dédiées. De nombreux modèles sont développés pour répondre aux nouvelles interrogations posées par un monde de plus en plus complexe (globalisation, accélération des échanges, virtualisation). La modélisation prospective axée sur l'énergie a été particulièrement dynamique, étant donné le caractère central de l'énergie dans la société actuelle.

La prospective est donc un outil d'aide à la décision qui vise à éclairer les conséquences futures des décisions prises aujourd'hui. On constate alors un lien sémantique fort avec l'analyse de cycle de vie conséquentielle. L'analyse prospective est résolument orientée vers le long terme, contrairement à la prévision qui porte sur le court terme. Toujours selon G. Berger, il ne faut cependant pas opposer les deux : « *Il ne s'agit pas de choisir entre prévision et prospective, mais de les associer. Chacune exige l'autre. Il faut, à la fois, savoir dans quelle direction l'on marche et s'assurer de l'endroit où l'on va poser le pied pour le prochain pas.* ». On peut ici faire une analogie avec l'analyse de cycle de vie conséquentielle à court et long terme.

1.4.2. Approche prospective et ACV

L'approche prospective en analyse de cycle de vie peut être conduite 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 nature incertaine (plusieurs options existantes), ou dont l'évolution est méconnue (Spielmann et al., 2005).

Elle est principalement mise en pratique via le développement et l'utilisation de « scénarios ». Le terme scénario prend alors deux sens distincts en ACV : la description d'une

situation représentée par un ensemble de variables et située à un point donné dans le temps, ou une évolution depuis les conditions actuelles jusqu'à une date future (Pesonen et al., 2000).

Le développement de scénarios en ACV peut concerner soit uniquement le système étudié (*foreground*) dans ce qui est appelé « *scenario-based LCA* » (Fukushima et Hirao 2002) soit concerner une partie de l'arrière-plan du système (*background*). Dans la première application, l'analyse de différents scénarios revient à une comparaison de variantes. La deuxième définition est celle qui correspond à l'étude prospective où l'on considère le futur comme incertain et où l'on cherche à estimer les risques de non robustesse d'une décision : si une variante A est plus performante qu'une variante B selon un certain scénario, l'incertitude liée au futur est-elle de nature à changer cette évaluation ?

L'étude approfondie du groupe de travail SETAC-Europe sur le développement des scénarios en ACV (Pesonen et al., 2000) propose une définition de l'étude prospective : « *The study of the future to develop a strategic attitude of the mind with a long-range view of creating a desirable future* ». Cette définition fait écho aux mots de G. Berger qui considère la prospective comme une attitude tournée de façon active vers l'avenir dans le but d'agir sur lui (Berger et al. 2007). Dans ce travail de la SETAC, il est souligné que la méthode des scénarios n'est qu'une partie des recherches sur le futur, distincte de la modélisation prospective (Pesonen et al., 2000 ; Höjer et Mattsson, 2000). Les différentes méthodes prospectives existantes peuvent être classées en deux catégories principales : descriptive (évolutions possibles de déterminants) ou normative (on cherche à atteindre un objectif futur fixé) comme montré dans le Tableau 6 adapté de McDowall et Eames (2006).

Tableau 6 : Typologie des méthodes prospective, adapté de McDowall et Eames (2006)

Descriptif	
Prévision	Extrapolation quantitative formelle et de la modélisation pour prévoir des futurs probables à partir de l'analyse des tendances actuelles.
Exploratoire	Explore des futurs possibles. Ils accentuent l'importance des déterminants et ne spécifient pas d'état final désirable prédéterminé. Exemple : scénarios collaboratifs (Bennett et al., 2003)
Scénarios Techniques	Explorent des systèmes technologiques futurs possibles. Ils soulignent la faisabilité technique et les implications des différentes options.
Normatif	
Vision	Élaboration d'un futur plus ou moins désirable. Met en avant les bénéfices apportés dans le futur plutôt que le moyen d'atteindre l'état futur.
Scénarios rétrospectifs	À partir d'un objectif futur fixé, ils déroulent rétrospectivement le/les chemins à suivre pour l'atteindre.
Feuille de route	Élaboration d'une série de mesures à prendre pour atteindre un futur désirable. Peut être construite à partir des visions et scénarios rétrospectifs associés.

Outre la modélisation prospective et le développement de scénarios, les autres méthodes mentionnées sont les méthodes d'extrapolation, les méthodes exploratoires, les méthodes participatives et les méthodes normatives. La modélisation et le développement de scénarios sont toutefois complémentaires : l'utilisation d'un modèle de prospective permet sur la base de règles de fonctionnement de l'ensemble étudié et de paramètres variables exogènes ou endogènes de construire un futur probable. La variation des paramètres incertains dans leur plage d'incertitude peut permettre de créer différents futurs probables, et donc plusieurs scénarios.

La plupart des études conséquentielles dans la littérature scientifique s'intéressent aux effets de long terme, ceux-ci étant généralement considérés comme prépondérants face aux effets de court terme (Ekvall et Weidema 2004; Weidema et al. 2009). Les modélisations reposent généralement sur une comparaison entre un futur de référence et un futur impacté par la décision étudiée. Des méthodologies très diverses sont mentionnées dans la littérature scientifique : projection dans le futur et sensibilité sur les paramètres incertains (Chen et al., 2012) ; utilisation de la dynamique des systèmes pour évaluer une flotte de véhicule sur une plage temporelle (Stasinopoulos et al., 2012) ; simulation technico-économique d'un système énergétique (Lund et al., 2010), inventaire des conséquences possibles d'une décision (Pehnt, 2006 ; Sandén et Karlström, 2007), analyse macro-économique en utilisant un modèle issu du GTAP (*Global Trade Analysis Project*) (Dandres et al., 2012), utilisation de modèles d'équilibre partiels (Ekvall and Andrae 2006).

1.4.3. Outils de modélisation prospective Énergie-Économie-Environnement

Les outils utilisés en modélisation prospective, en l'espèce des modèles de détermination de futurs possibles, sont très nombreux. On peut les regrouper en six grandes familles, comme montré sur la Figure 8. Les modèles peuvent être « *bottom-up* » (construits sur l'agrégation de données technologiques précises et détaillées d'un secteur), « *top-down* » (construits sur la désagrégation de variables macro-économiques) ou hybrides, intégrant les deux types d'approches. Ce sont ensuite soit des modèles d'optimisation soit des modèles de simulation.

	Bottom-Up (technologies explicites)	Hybride	Top-Down (cohérence macro)
Optimisation	optimisation sectorielle ex. MARKAL ...	optimisation sect. et équilibre écon. ex. MERGE ...	croissance optimale ex. DICE ...
Simulation	simulation récursive sectorielle ex. POLES ...	équilibre général récursif ex. IMACLIM ...	équilibre général récursif synth. ex. GREEN ...

Figure 8: Famille de modèles de prospective intégrant énergie, économie et environnement¹⁴

Les modèles d'optimisation cherchent à minimiser une fonction coût, par exemple le coût global de satisfaction de la demande sur un secteur et un horizon temporel donné (optimisation sectorielle), ou à optimiser la répartition du pouvoir d'achat disponible entre épargne et investissement (modèle de croissance optimale). Les modèles hybrides combinent une optimisation sectorielle avec un équilibre macro-économique.

Les modèles de simulation peuvent être des modèles d'équilibres généraux qui cherchent le prix d'équilibre entre l'offre et la demande, ou des modèles technologiques qui simulent un système de production en fonction de la demande (par exemple, modèle de simulation récursif sectoriel). Les modèles de simulation sont dits « récursifs » car ils modélisent pas à pas (la plupart du temps année après année) les sorties du modèle (p. ex. un nouvel équilibre économique), en s'appuyant sur la modélisation de la période précédente. Au contraire, les modèles d'optimisation tiennent compte directement de l'intégralité de la période à optimiser.

Les modèles synthétiques (équilibre général récursif synthétique comme le modèle GREEN) sont appelés ainsi car ils présentent une représentation très agrégée de l'économie, avec peu de secteurs. Les modèles hybrides comme IMACLIM comprennent une structure générale basée sur la résolution d'un équilibre économique et des modules décrivant plus précisément l'évolution technologique de certains secteurs (énergétique, résidentiel...).

Suivant l'objectif de l'étude et la question à laquelle on souhaite répondre, on va s'orienter vers une famille précise. Ces modèles présentent des visions et des approches du fonctionnement de la société très différentes et leurs résultats ne sont pas directement comparables mais plutôt complémentaires.

Le modèle POLES a par exemple été utilisé pour évaluer l'impact d'une taxe carbone européenne (Babiker et al., 2003), ou pour le développement de scénarios mondiaux d'évolution de la consommation d'énergie à l'horizon 2100 (Kitous et al., 2010). Le modèle IMACLIM est également utilisé pour l'évaluation des politiques publiques, pour savoir par

¹⁴ http://www.celluleenergie.cnrs.fr/IMG/pdf/7-Patrick_CRIQUI.pdf

exemple quel outil fiscal est le plus efficace pour favoriser la maîtrise de l'énergie (Giraudet 2011 ; Giraudet et al. 2012). Les modèles MARKAL sont plus centrés sur l'évolution technologique, comme le rôle du nucléaire (Vaillancourt et al., 2008), les bâtiments intelligents (Bouckaert et al., 2013), l'évolution de la fiabilité des réseaux électriques (Drouineau et al., 2010). MERGE a été notamment utilisé pour évaluer l'impact sur les émissions de CO₂ du retrait des États-Unis du Protocole de Kyoto (Manne et Richels, 2004). On retrouve les modèles DICE (un des premiers modèles développés) et GREEN (développé par le secrétariat de l'OCDE) sur des thématiques similaires, concernant l'évaluation de politiques climatiques mondiales (Lee et al. 1994 ; Nordhaus 2008).

Une des difficultés de l'utilisation de ces modèles en analyse de cycle de vie est la pauvreté des extensions environnementales associées. En effet, les bases de données de l'ACV riches de milliers de flux répertoriés nous permettent de conduire des analyses environnementales multicritères. A contrario, les tables environnementales associées aux modèles de prospective, en particuliers aux modèles économiques, incluent généralement quelques gaz à effet de serre (au maximum, les six du Protocole de Kyoto), parfois l'utilisation de l'eau, mais restent très limitées. De plus, si les modèles d'équilibres globaux permettent un raisonnement analogue à celui de l'impact en cycle de vie en tenant compte des répercussions sur l'ensemble de l'économie, ce n'est pas toujours le cas pour les modèles sectoriels (processus identique à l'utilisation des méthodes IO, présentées en Annexe A). Il est important de s'assurer que l'ensemble des émissions du cycle de vie sont prises en compte et pas seulement les émissions directes du secteur, comme c'est le cas dans certains modèles MARKAL par exemple (Assoumou, 2006).

1.4.4. Cartographie des évolutions possibles pour les ensembles bâtis

Une cartographie de l'ensemble des évolutions possibles a été effectuée afin de recenser, trier et prioriser les éléments à prendre en compte dans une modélisation générique (applicable à tout type de projet urbain en France), intégrée et multi-échelle des bâtiments et des quartiers. Elle est présentée dans le Tableau 7 page suivante.

Quatre cas de figure ont été identifiés pour ces différentes évolutions possibles :

- **Code couleur rouge** : évolution concernant le comportement des occupants et des citoyens. Ces évolutions sont en particulier traitées par les sociologues travaillant sur l'évolution des modes de vie et ne seront pas traités dans le cadre de cette thèse. Des travaux existent concernant la consommation d'énergie dans les bâtiments résidentiels (Wilson et Dowlatabadi, 2007) ou plus généralement concernant les déterminants de la consommation des ménages (Tukker et al., 2010).
- **Code couleur orange** : évolutions fortement influencées par le contexte local (p. ex. transport des occupants, fonctionnement du réseau de chaleur urbain). Si des informations sont disponibles concernant le contexte local dans lequel s'inscrit le projet urbain (p. ex. étude prospective de l'offre de transport locale,

planification de la rénovation du réseau de chaleur), alors ces éléments peuvent être intégrés à l'étude, les paramètres permettant de les modéliser étant en général présents dans les outils d'aide à la conception (p. ex. nombre de km parcourus, moyens de transport utilisés, mix énergétique du réseau de chaleur). En l'absence de données, le principe de précaution est appliqué et on considère de façon conservative que la situation future est identique à la situation présente.

- **Code couleur noir** : évolutions technologiques pour lesquelles trop peu de données sont disponibles (p. ex. nouvelle technologie de chauffage au gaz disponible dans 30 ans). Pour ces évolutions, le principe de précaution est appliqué et les procédés actuels sont conservés.
- **Code couleur vert** : éléments suffisamment documentés et d'envergure nationale permettant leur intégration dans un outil d'aide à la décision en phase avant-projet. Ils concernent l'évolution des systèmes énergétiques et l'évolution des paramètres météorologiques. Ce sont également des éléments dont l'influence sur les résultats d'analyse de cycle de vie des bâtiments et des quartiers est majeure (Ortiz et al., 2010 ; Peuportier et al., 2013).

La phase de construction n'est pas considérée car elle intervient au moment présent. Les matériaux structurels dont la durée de vie est identique à celle de l'ouvrage considéré ne sont pas renouvelés sur la durée de vie du bâtiment et ne sont donc pas intégrés, sauf pour ce qui est de leur devenir en fin de vie (Démolition).

Tableau 7 : Cartographie des évolutions prospectives, par phases et contributeurs

Phase ACV	Contributeur	Évolutions possibles
Utilisation	Chauffage des locaux	<p>Augmentation des températures de consigne (ex : vieillissement de la population (Mettetal, 2009))</p> <p>Diminution des températures de consigne (ex : augmentation des prix de l'énergie, précarité énergétique (Mettetal, 2009))</p> <p>Augmentation de la température extérieure (ex : réchauffement climatique (GIEC, 2013))</p> <p>Diminution de la performance thermique du bâti (ex : vieillissement des matériaux structuraux, par exemple (Simmler et Brunner, 2005))</p> <p>Augmentation du rendement des installations (ex : nouvelles technologies)</p> <p>Évolution du système énergétiques (ADEME, 2013)</p>
	Climatisation des locaux	<p>Changement des températures de consignes</p> <p>Augmentation de la température extérieure (ex : réchauffement climatique (GIEC, 2013))</p> <p>Augmentation du rendement des installations (ex : nouvelles technologies)</p> <p>Évolution du système énergétique (ADEME, 2013)</p> <p>Augmentation de l'îlot de chaleur urbain (Lemonsu et al., 2012)</p>
	Chauffage de l'ECS	<p>Augmentation de la température d'eau froide (ex : récupération de chaleur sur eaux usées (Baek et al., 2005), réchauffement climatique)</p> <p>Augmentation de la consommation ECS (ex : augmentation du confort)</p> <p>Diminution de la consommation (ex : augmentation des prix de l'énergie)</p> <p>Augmentation du rendement des installations (ex : nouvelles technologies)</p> <p>Diminution du rendement des technologies (ex : vieillissement des installations (Mindjid, 2011))</p> <p>Diminution de la température de consigne (tendance observée, mais limite basse légionellose)</p> <p>Évolution du système énergétique (ADEME, 2013)</p>
	Eau	<p>Diminution de la consommation d'eau (ex : équipements plus performants, comportement des occupants, récupération de l'eau de pluie)</p> <p>Augmentation de la consommation d'eau (nouveaux usages)</p> <p>Augmentation du rendement du réseau d'eau (rénovation)</p> <p>Diminution du rendement du réseau d'eau (vieillissement des installations)</p>
	Électricité spécifique	<p>Diminution de la consommation due à l'augmentation de l'efficacité des appareils (ENERTECH, 2007)</p> <p>Diminution de la consommation due au comportement des occupants (p. ex. sensibilité à l'environnement) (ADEME, 2013)</p> <p>Augmentation de la consommation due à l'apparition de nouveaux usages de l'électricité, p. ex. véhicule électrique (ADEME, 2013)</p> <p>Évolution du système énergétiques (ADEME, 2013)</p>
	Transport des occupants	<p>Évolution de l'offre de transport locale</p> <p>Évolution du comportement des occupants (p. ex. sensibilité à l'environnement, prix des carburants)</p>
	Gestions des déchets ménagers	<p>Augmentation du tri</p> <p>Diminution des emballages</p> <p>Amélioration de la performance des usines de recyclage</p> <p>Augmentation de la valorisation énergétique des déchets</p>

		ménagers
	Production locale d'électricité	Changement du rayonnement solaire incident (ex : masques supplémentaires dus à l'urbanisation, changement climatique) Pertes de rendement des installations (ex : échauffement des panneaux dû au réchauffement climatique (Skoplaki et Palyvos, 2009)) Évolution du système énergétique (ADEME, 2013)
Rénovation & Démolition	Portes/ Vitrages/ Revêtement	Augmentation de la durée de vie des composants lors du renouvellement Traitement en fin de vie : % recyclée/réutilisée/incinérée/décharge Renforcement des performances thermiques des nouveaux composants installés Nouvelles technologies disponibles lors du renouvellement
	Équipements	Augmentation de la durée de vie des composants lors du renouvellement Nouvelles technologies disponibles lors du renouvellement
	Matériaux de construction	Scénarios de fin de vie : - augmentation du recyclage en boucle fermée/ouverte ; - généralisation de la récupération d'énergie sur l'incinération ; - augmentation de la réutilisation ; - amélioration du traitement en décharge.
	Distance Site- Décharge	Diminution de la distance du site au traitement Amélioration de l'efficacité des camions (normes EURO) Diversification des moyens de transport vers la décharge (ex : véhicules électriques, Gaz ?)
	Distance usine-Site	Diminution de la distance usine-site : Relocalisation des activités Amélioration de l'efficacité des camions (normes EURO) Diversification des moyens de transport depuis l'usine (ex : véhicules électriques, Gaz ?)

Deux évolutions paraissent prioritaires : elles sont les mieux documentées et interviennent dans l'évaluation des contributeurs majoritaires au niveau des résultats d'ACV. L'évolution des systèmes énergétiques et l'évolution du climat sont donc les deux déterminants retenus dans un premier temps pour le développement de scénarios prospectifs. L'étude de ces déterminants est présentée ci-après, la mise en pratique à travers le développement de scénarios est présentée dans le Chapitre 4.

Concernant l'évolution des vecteurs énergétiques, on peut noter que celle-ci peut être facilement prise en compte au niveau de la phase d'utilisation du bâtiment. Par contre, cette évolution interviendra également au niveau des phases de rénovation et de démolition. La fabrication des composants doit être contextualisée, « régionalisée » (Baitz et al., 2012), au minimum en tenant compte du mix électrique du pays dans lequel se déroule la production. Au moment du renouvellement, les procédés de fabrication des nouveaux composants (et également les procédés de traitement en fin de vie des anciens composants) devraient également être contextualisés en tenant compte des évolutions des vecteurs énergétiques.

1.4.5. Étude des déterminants

1.4.5.1. ÉVOLUTION CLIMATIQUE

L'évolution du climat va entraîner des modifications de la consommation énergétique des bâtiments et de la production d'électricité. L'augmentation des températures affecte la consommation énergétique du bâtiment ou quartier étudié (Dodoo et al., 2014). Une étude commandée en 2010 par l'ADEME sur le comportement thermique des bâtiments BBC à l'horizon 2030 et 2050 montre de plus que certains choix de conception comme le renforcement de l'inertie permet d'atténuer la dégradation du confort estival dû au réchauffement climatique (ADEME, 2010b). Une étude de 2011 menée par une équipe de recherche de Météo-France a évalué l'évolution du climat de la région parisienne en conséquence de l'augmentation du forçage radiatif mondial (Lemonsu et al., 2012). Les auteurs concluent à une diminution de 30 % environ des degrés-jours unifiés de chauffe et une multiplication par 10 environ des degrés-jours unifiés de refroidissement, voir Figure 9.

À l'échelle de la France, les scénarios développés par le GIEC sont régionalisés par les équipes de Météo-France et donnent pour chaque région et chaque saison l'évolution prévue des variables climatiques (Ouzeau et al., 2014). Ces scénarios prévoient une augmentation de la température moyenne hivernale de 0,9 à 3,5 °C et une augmentation moyenne estivale de 1,3 à plus de 5 °C.

Table 2 Heating and cooling degree days per year (Unit: °C day) averaged for urban and suburban areas over present (36 years) and future (27 years) climates

	Urban		Suburban	
	HDD	CDD	HDD	CDD
Obs (1971–2006)	2,352	17	–	–
Present (1971–2006)	2,330	14	2,493	10
Future A1B (2072–2098)	1,691	127	1,911	115
A2 (2072–2098)	1,554	207	1,765	191
Future–present A1B	–639	+113	–582	+105
A2	–776	+193	–728	+181

Figure 9 : Évolution possible des degrés-jours unifiés de chauffe (HDD) et de refroidissement (CDD) en région parisienne à l'horizon 2100 (Lemonsu et al., 2012)¹⁵

Les bouleversements climatiques perturbent aussi la production d'électricité en modifiant le régime des précipitations et la fonte des glaciers.

Concernant le réseau électrique et l'influence des changements climatiques sur son fonctionnement, très peu de scénarios prennent ces facteurs en compte, que ce soit

¹⁵ Les données « Obs » correspondent aux observations historiques des données météorologiques alors que les données « Présent » correspondent aux données reconstitués par le modèle pour le climat actuel.

l'augmentation des températures ou la variation des ressources hydriques. Au mieux, un récent scénario de l'ADEME (2015b) intègre une analyse de sensibilité sur le risque de sécheresse et sur des années climatiques variées afin de vérifier la viabilité de ce scénario dans les différents cas, en précisant « *qu'aucune hypothèse de changement climatique n'a été effectuée dans cette étude* ».

Un récent document technique du GIEC publié en 2008¹⁶ cite les travaux de Lehner et al. (2005) qui prévoit pourtant « *une diminution du potentiel d'énergie hydraulique de 6 % dans toute l'Europe, avec une diminution de 20 à 50 % dans les régions méditerranéennes* » d'ici 2070. Concernant les besoins en eau de refroidissement pour les centrales thermiques (nucléaire, gaz ou charbon), les travaux de Förster et Lilliestam (2009) indiquent une réduction potentielle du facteur de charge annuel moyen pouvant aller jusqu'à 11,8 % pour une centrale nucléaire située en Europe centrale.

Le réchauffement climatique pourrait également avoir des conséquences importantes sur le secteur forestier et agricole (Olesen et Bindi, 2002 ; Rounsevell et al., 2006 ; Kirilenko et Sedjo, 2007). La disponibilité des vecteurs énergétiques bois, biomasse et biogaz, utilisés dans le cadre de la production d'électricité ou de chaleur pourrait donc également être affectée.

L'intégration de l'évolution du climat dans l'analyse de cycle de vie des bâtiments et des quartiers pourrait alors modifier de façon importante les résultats des études effectuées.

1.4.5.2. ÉVOLUTION TECHNOLOGIQUE

Outre les besoins en électricité spécifique, les bâtiments consomment de l'énergie pour des besoins de chauffage (des locaux et de l'ECS) et de refroidissement, pour lesquels plusieurs vecteurs énergétiques peuvent être mobilisés.

Les options pour la production de chaleur sont très variées, contrairement à la production de froid :

- Chaudières individuelles ou collectives, pouvant être au fioul, au gaz naturel, au bois et éventuellement au gaz propane ou butane pour les sites isolés. Différentes technologies existent : chaudière atmosphérique, bas-NO_x, modulante, à condensation...
- Réseaux de chauffage urbain, dont le mix énergétique peut varier : gaz naturel, bois, UIOM, géothermie, électricité, fioul, charbon...
- Pompes à chaleur, air/air ou géothermique, réversible ou non, fonctionnant à l'électricité ou au gaz.
- Panneaux solaires thermiques, éventuellement avec un appoint électrique ou gaz.
- Autres systèmes électriques : convecteur, chauffage à air, chauffe-eau à accumulation...

Mis à part les systèmes de ventilation naturelle passive (donc ne consommant pas d'énergie), les systèmes actifs fournissant du refroidissement sont principalement électriques,

¹⁶ <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/ccw/climate-change-water-fr.pdf>

que se soient des climatiseurs ou des pompes à chaleur réversibles. Le gaz est également une option.

L'innovation ainsi que les réglementations ont fait évoluer les technologies à disposition pour produire l'énergie nécessaire au fonctionnement des bâtiments. Ce processus va se prolonger dans le futur et certaines tendances d'évolution peuvent être anticipées.

On considère ici, comme mentionné plus haut, les paramètres concernant le système d'arrière-plan et influençant les décisions prises sur la conception. Les éléments suivants du système d'arrière-plan peuvent être intégrés.

Production de chaleur et d'électricité :

- La fourniture de gaz du réseau : encore majoritairement issu du gaz naturel conventionnel, l'épuisement du gisement conventionnel, l'essor des sources non conventionnelles, le développement de filières biogaz ou hydrogène pourrait modifier de façon importante le bilan de ce combustible, comme suggéré dans de récentes études ACV sur les gaz de schistes (Howarth et al., 2011 ; Rehl et al., 2012) ou le biogaz (Rehl et al., 2012 ; Whiting et Azapagic, 2014).
- Il est probable qu'à moyen ou long terme, les combustibles comme le fioul et le charbon seront exclus des réseaux de chaleur urbains. Il est également probable que l'efficacité des unités d'incinération des déchets sera améliorée et que la co-voire tri-génération se généralisera pour ces équipements.
- Il y a peu d'information permettant de considérer une évolution de la production du combustible bois. En France, zone océanique tempérée, les effets du changement climatique pourraient être de nature très différente : augmentation de la croissance du bois versus augmentation des événements extrêmes (feu de forêt, inondation) (Lindner et al., 2010).

Production d'électricité seule :

- Le mix électrique va être amené à évoluer. En fonction de l'évolution de la demande, du développement des énergies renouvelables et des choix politiques sur des technologies comme le nucléaire. Plusieurs scénarios prospectifs ont été développés pour ce secteur en France, émanant de nombreux acteurs différents : gestionnaires du réseau (RTE, 2012), institutions (ADEME, 2013), groupes de recherche (Maizi et al., 2006), ONG (négaWatt, [sans date]), etc. Si les scénarios s'accordent généralement sur une augmentation de la part des énergies renouvelables dans le futur, la place du nucléaire varie fortement (de majoritaire à inexistant). La demande totale en électricité est aussi très variable, ce qui influence profondément les choix technologiques disponibles.

1.4.6. Conclusion sur les enjeux prospectifs

Une analyse de cycle de vie appliquée aux ensembles bâtis ne peut pas négliger les aspects de long terme. Les questions de prospective énergétique sont essentielles : la durée de vie du système étudié est longue, les interactions avec le secteur de l'énergie sont importantes. Cependant, l'approche prospective doit se faire sous un angle bien défini, dans le cadre d'une étude de tendance et de recherche de robustesse de l'analyse environnementale. L'analyste doit prendre garde à ne pas s'attarder sur les chiffres résultant des modèles mais bien sur les tendances et les effets observés. L'approche prospective est donc complémentaire à une approche de court terme. Elle peut être assimilée à une étude de sensibilité.

L'enjeu de la prospective est de déterminer quelles décisions actuelles ont le plus de chance de nous mener vers un futur « agréable ». Il faut donc prendre garde à ne pas créer de situation paradoxale. Par exemple dans le secteur de l'électricité, la réduction de la consommation d'électricité est un préalable à l'établissement de mix « vert » dans de nombreux scénarios. Toutefois, si un bâtiment actuel est évalué avec un mix prospectif « vert », sa contribution dans le bilan total du bâtiment sera faible, ce qui n'incitera pas à réduire la consommation d'électricité.

Un travail de consolidation et d'homogénéisation lié aux inventaires de cycle de vie doit être entrepris par la communauté des chercheurs pour faire fonctionner les modèles utilisés en prospective, selon une approche en cycle de vie.

Les deux déterminants retenus prioritairement pour l'élaboration d'une méthodologie prospective pour les bâtiments et les quartiers sont le changement climatique et l'évolution du système énergétique.

1.5. DU BÂTIMENT AU QUARTIER

1.5.1. Introduction

Passer de l'échelle du bâtiment à l'échelle du quartier implique une augmentation significative de la complexité de l'étude environnementale. De nouveaux éléments doivent être intégrés, comme les voiries, les réseaux urbains et les espaces verts (voir Figure 10). En plus de ces nouveaux contributeurs, des interactions complexes entre les différents éléments du système urbain ont lieu et doivent si possible être prises en compte :

- masques proches des bâtiments sur leurs voisins : influence du plan masse sur la consommation énergétique des bâtiments ;
- possibilité d'échanges énergétiques entre les bâtiments, production d'énergie sur certains bâtiments autoconsommée par l'ensemble du quartier ;
- fonctionnement des réseaux de chaleurs urbains et liens potentiels avec le traitement des déchets ;
- aménagement du quartier (p. ex. voies douces, places de parking) et transport quotidien des occupants.

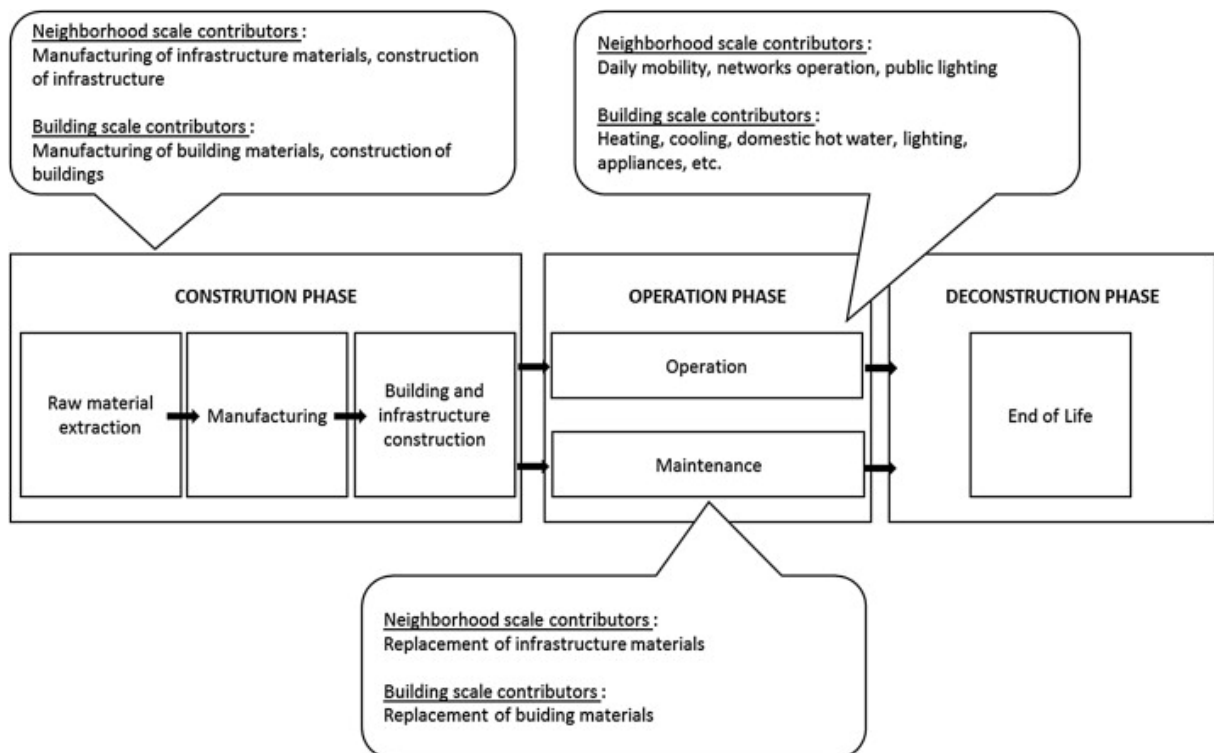


Figure 10 : De l'ACV bâtiment à l'ACV quartier (Lotteau et al., 2015)

Les travaux de Popovici (2005) et Herfray (2011) ont permis d'intégrer dans les études ACV de nouveaux contributeurs (réseaux, voiries, espaces verts) et certaines des interactions évoquées : prise en compte des effets de masque et production d'énergie sur site

notamment. Les méthodologies attributionnelles et conséquentielles décrites précédemment pour les bâtiments peuvent s'appliquer directement pour ces contributeurs (technologies marginales de production des matériaux ou de l'énergie consommée, carbone biogénique, prise en compte du recyclage, etc.).

Les cas du transport quotidien des occupants et du traitement des déchets par incinération nécessitent un approfondissement des méthodes existantes afin de pouvoir être intégrés à une approche « conséquentielle-projet » telle que développée dans cette thèse. L'ajout d'un nouveau quartier peut modifier le fonctionnement à la marge des infrastructures locales de transport et de gestion des déchets. Ces enjeux sont analysés plus en détail dans le Chapitre 5 après une introduction rapide sur ces deux thématiques dans les paragraphes suivants.

1.5.2. Transport quotidien des occupants

La modélisation des impacts environnementaux liés à la mobilité des usagers d'un quartier en ACV est généralement faite à partir d'outils simplifiés tenant compte de la distance parcourue par mode en fonction de l'éloignement des services (emplois, commerces, administrations) et de la performance des infrastructures de transports en commun. Un des outils les plus aboutis existant aujourd'hui pour le contexte français est la calculatrice éco-mobilité Effinergie¹⁷ développée par l'association du même nom en partenariat avec le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).

Cet outil évalue la contribution de la mobilité des occupants d'un bâtiment ou d'un quartier sur la consommation d'énergie primaire et l'augmentation de l'effet de serre. Il tient compte de quatre types de contexte urbain (ville-centre, banlieue, pôles secondaires, rural). L'accessibilité du site aux modes doux et aux transports en commun est renseignée par l'utilisateur ; trois appréciations sont possibles : bonne, moyenne ou faible. Ces données associées aux données statistiques des enquêtes transport permettent de déterminer les parts modales par type de destination et les distances cumulées par mode de transport. Les impacts environnementaux par modes sont obtenus à partir de la base de données ecoinvent v2.2.

Un utilisateur peut, grâce à cet outil, modéliser son propre comportement en fonction de son lieu de travail ou de ses préférences en termes de loisirs et d'achats, ce qui lui donne des pistes d'amélioration de son empreinte mobilité. Mais cet outil est moins adapté pour le concepteur d'un quartier ou une collectivité concernée par un projet de développement urbain. Ceux-ci doivent analyser de façon fine l'impact du nouveau projet sur les infrastructures existantes. Des outils dédiés de simulation locale de la mobilité ont été développés dans cette optique. À partir d'une description détaillée des infrastructures de transports, ces outils sont capables de calculer le nombre et la vitesse de circulation des

¹⁷ <http://www.effinergie-ecomobilite.fr>

véhicules particuliers sur différents axes, ainsi que la quantité d'usagers des transports en commun.

La méthodologie développée dans cette thèse propose un couplage entre ces outils et l'ACV des quartiers. L'intégration de cette méthodologie à une approche « conséquentielle-projet » permet de tenir compte par exemple d'une possible augmentation de la congestion ou de la saturation des transports en commun suite à l'ajout d'un nouveau quartier.

1.5.3. Traitement des déchets ménagers

L'analyse des déchets ménagers est généralement traitée de façon indépendante des autres éléments du quartier, et notamment des réseaux de chaleur urbains. En ACV attributionnelle, les impacts de l'incinération des déchets sont alloués selon une clef de répartition à définir entre ses deux fonctions : le traitement des déchets et la production d'énergie. Cette clef n'est plus nécessaire avec une approche conséquentielle-projet. L'allocation entre différentes activités est évitée pour analyser la conséquence de la décision prise sur le système urbain, dont font partie le traitement des déchets et la production d'énergie (réseau de chaleur urbain).

Plusieurs paramètres influencent les impacts liés au traitement des déchets et sont analysés dans la suite :

- la situation technico-économique du réseau de chaleur urbain ;
- le type de déchets à traiter ;
- le type d'énergie produit par l'incinérateur (chaleur, électricité, éventuellement froid).

1.6. CONCLUSION DU CHAPITRE

Le cas particulier de l'étude des bâtiments et des quartiers nécessite un approfondissement des méthodologies ACV et notamment une meilleure prise en compte des interactions entre le système étudié et son système d'arrière-plan. L'utilisation de l'analyse de cycle de vie dans le cadre de l'écoconception des bâtiments et des quartiers doit être traitée selon une approche conséquentielle.

Les conclusions de l'état de l'art sont les suivantes :

- L'étude particulière des impacts liés à l'électricité dans les bâtiments nécessite l'appui d'une modélisation dynamique du système électrique. À ce titre, la contribution de l'ACV dynamique est essentielle.
- Les modélisations attributionnelle et conséquentielle peuvent cohabiter au sein d'une même étude. De même, les approches économiques comme l'ACV hybride sont complémentaires de l'approche conséquentielle. Elles permettent d'améliorer l'exhaustivité de l'inventaire.
- L'ACV conséquentielle est applicable au niveau micro-économique. Une somme de décisions à petite échelle peut finir par créer un impact structurel : la part de chauffage électrique dans le secteur résidentiel et tertiaire est aujourd'hui un élément dimensionnant du système électrique français.
- L'ACV conséquentielle est applicable à court terme, en particulier pour le cas de l'électricité en France, qui est un marché quasi-monopolistique et fortement influencé par les politiques publiques.
- Certaines méthodes existantes dans les outils d'analyse de cycle de vie des bâtiments et des quartiers n'ont pas été explicitement liées à une approche conséquentielle par le passé mais peuvent être considérées comme pleinement cohérentes avec cette approche. Il s'agit de la prise en compte des impacts évités liés au recyclage des matériaux ou à l'export d'énergie ainsi que de la prise en compte différenciée du carbone biogénique selon la provenance du bois et les phases du cycle de vie du système étudié.
- L'introduction d'une vision prospective est nécessaire sur la durée de vie du système étudié. C'est donc particulièrement important concernant les bâtiments et les quartiers dont la vie en œuvre dépasse plusieurs décennies. La question du changement climatique et de l'évolution du système énergétique seront traités en priorité pour l'axe prospectif.
- Le passage de l'étude des bâtiments à l'étude des quartiers implique une augmentation de la complexité de l'étude et l'intégration à l'ACV d'outils dédiés d'analyses locales.

Les trois axes d'étude proposés sont complémentaires. L'axe dynamique et l'axe prospectif peuvent être traités selon une approche attributionnelle ou conséquentielle. Leur intérêt réside dans une meilleure connaissance du système étudié et une modélisation plus précise et plus exhaustive de celui-ci. L'axe conséquentiel s'appuie sur les informations

supplémentaires données par les modélisations dynamique et prospective pour modéliser de façon plus réaliste les conséquences d'une décision.

Chapitre 2. Modélisation dynamique du système électrique

2.1. INTRODUCTION

L'évaluation des conséquences environnementales d'une conception de bâtiment ou de quartier dans la situation complexe décrite au Chapitre 1 nécessite de comprendre et de représenter la dynamique du fonctionnement du système électrique.

Une première approche pourrait s'appuyer sur les historiques de production en moyennant les mix horaires obtenus sur différentes années. Cependant, plusieurs raisons conduisent à mettre de côté cette méthode. D'abord, la cohérence avec les données climatiques n'est pas assurée. Une vague de froid (ou de chaud) a des conséquences simultanées sur le bâtiment ou quartier étudié et sur le système électrique. Ces effets ne peuvent être représentés par une moyenne historique. De plus la représentation du fonctionnement marginal du système électrique est inaccessible à partir de données moyennes. Celles-ci ne permettent pas de simuler une variation de production. Enfin, la question d'accessibilité des données est importante : pour construire un modèle de production « type » lissant les aléas climatiques et économiques, il est nécessaire d'avoir accès à de nombreuses années. Un minimum de 10 années est prévu pour la construction de données météorologiques « type » par la norme NF EN ISO 15927-4. Concernant la production électrique, seules trois sont disponibles de façon détaillée actuellement (2012, 2013 et 2014), grâce au récent dispositif de transparence Eco2mix mis en place par RTE, le gestionnaire du réseau électrique français.

On doit alors s'orienter vers un outil de simulation de la production électrique. Plusieurs outils de ce type existent : des modèles de simulation basés sur un empilement des moyens de production (ADEME, 2013), des modèles d'optimisation court terme comme ENERGYPLAN (Lund, 2007), ou long terme comme les modèles de prospective type MARKAL (Assoumou, 2006). Une revue assez complète sur les modèles existants a été effectuée par Connolly (2010). Sur l'ensemble des outils existants, peu sont des logiciels libres open source répondant à nos attentes (simples, adaptables à l'étude des bâtiments et des quartiers, adaptables au contexte français).

Un modèle comme EnergyPlan, adapté à l'étude de système 100 % renouvelables tient compte de l'ensemble du système énergétique mais son utilisation nécessiterait une mise en cohérence avec les données climatiques utilisées pour conduire les études de simulation thermique dynamique des bâtiments. De plus, dans ce modèle, le niveau de production des centrales nucléaires est fixe, i.e il n'est pas impacté par la demande et les autres moyens de production (thermiques fossiles notamment). Or la modulation saisonnière et journalière des centrales nucléaires est une caractéristique importante du système électrique français. Les modèles MARKAL sont appropriés pour traiter des questions de prospective, mais pas les analyses court terme. Le modèle BALMOREL (Ravn et al., 2001) est quant à lui un logiciel open source, qui permet donc de façonner directement le code source selon nos besoins. Cependant, c'est également un logiciel très complexe et au vu des informations nécessaires en sus de l'apprentissage du langage GAMS, il est tout aussi simple et plus transparent de construire notre propre modèle. Des outils spécifiquement développés pour l'étude du cadre français, comme les modèles de l'ADEME, le logiciel ANTARES de RTE et la suite logiciel Artélis

Cristal Energy développé par Artélyls¹⁸ sont des outils privés ou à vocation d'utilisation interne, donc non disponibles.

En conséquence, nous n'avons pas trouvé de modèle ou de méthodologie complète existante et répondant de façon satisfaisante à la problématique posée, notamment concernant la problématique de cohérence entre le référentiel utilisé pour l'étude du mix électrique et celui utilisé pour l'étude des bâtiments. Il a donc été décidé de construire un nouveau modèle de représentation du mix électrique adapté à l'étude des bâtiments et des quartiers. Les informations méthodologiques disponibles sur les modèles existants, en particulier le modèle EnergyPLAN ainsi que ceux de l'ADEME, d'Artélyls et de RTE, ont été étudiées et utilisées pour la réalisation du nouveau modèle.

L'objet de ce chapitre est de décrire ce modèle explicite du système électrique permettant d'associer un mix de production à chaque heure de l'année. Le modèle doit générer des mix cohérents avec les données utilisées en thermique du bâtiment et indépendants d'aléas climatiques ou économiques inhérents aux années réelles (p. ex. vague de froid, canicule, grèves, autres aléas).

Le principe de la modélisation est premièrement exposé. Après un point sur la demande à satisfaire considérée, l'ensemble des technologies de production actuelles sont présentées. La modélisation proposée pour chaque type de technologie retient une partie seulement de sa complexité afin de faire ressortir le fonctionnement d'ensemble du système. Un dernier paragraphe aborde les limitations du modèle proposé.

2.2. PRINCIPE DE LA MODÉLISATION

La modélisation s'appuie sur l'ensemble des données disponibles sur le site de RTE¹⁹, sur plusieurs entretiens avec des gestionnaires du réseau de transport (RTE) ainsi que sur deux méthodologies développées sur ce thème, l'une par le bureau d'étude Artélyls dans le cadre d'un rapport sur le potentiel de stockage de l'électricité²⁰ et l'autre par l'ADEME dans le cadre de son exercice prospectif « Vision 2030-2050 »²¹.

On considère trois grands ensembles à modéliser, dont les modèles sont explicités dans les paragraphes suivants :

- La demande en électricité (paragraphe 2.3), somme de la consommation nationale (paragraphe 1), des exportations (paragraphes 2.3.3) et de la consommation des stations de pompage (paragraphe 2.3.4) diminuée des importations (paragraphes 2.3.3).
- Les productions fatales (paragraphe 2.4.2), indépendantes de la demande en électricité mais dépendantes de facteurs météorologiques (p. ex. éolien) ou de variables économiques locales inconnues (p. ex. incinérateur de déchets ménagers).

¹⁸ <http://www.artelyls.com/fr/applications/artelyls-crystal-energy>

¹⁹ <https://clients.rte-france.com/>

²⁰ <http://ademe.typepad.fr/files/peps---rapport-public1.pdf>

²¹ <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=85536&p1=00&p2=07&ref=17597>

- La production modulable (paragraphe 2.4.3), qui couvre la demande résiduelle une fois les productions fatales soustraites.

Les productions fatales, indépendantes du niveau de la demande, sont modélisées en premier dans le modèle et soustraites de la consommation nationale. La demande à satisfaire est ensuite ajustée avec les échanges aux frontières (ajout des exports, soustraction des imports) et augmentée de la consommation due au pompage des STEP. Les unités de production modulables doivent ensuite satisfaire la demande résiduelle en fonction de leur coût et de leurs contraintes technologiques.

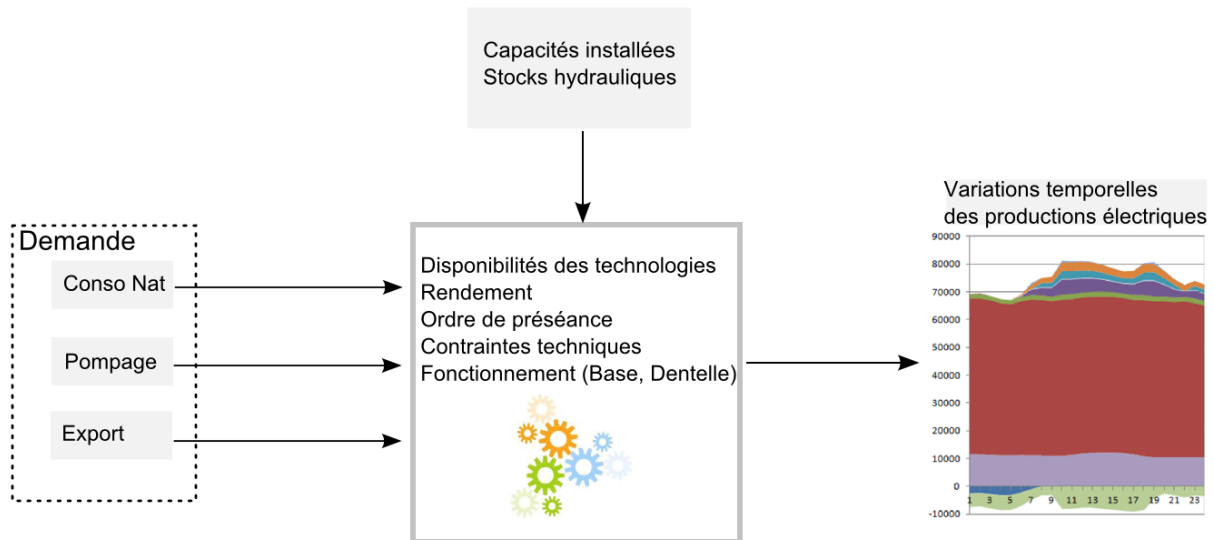


Figure 11 : Principe de la modélisation simplifiée du système de production d'électricité

Le modèle est d'abord calibré sur les années réelles 2012 et 2013, puis validé sur 2014 (années pour lesquelles des données de production horaire technologie par technologie sont disponibles grâce au récent dispositif de transparence Eco2mix mis en place par RTE²²). On prend garde à ce qu'il n'y ait pas de recoupement entre les données utilisées pour le calibrage et celles utilisées pour la validation. L'année 2014 n'est jamais utilisée pour le calibrage.

Dans un second temps, de même que lorsqu'on utilise les données météorologiques réelles pour construire des données météorologiques types comme les TRYs, « *Test Reference Years* » (Lund, 1985), on cherche ici à construire un modèle de détermination de la production électrique et de ses variations horaires dans un cadre « type ». On utilise par exemple une demande représentative des données types utilisées en STD (Simulation Thermique Dynamique), les disponibilités historiques moyennes des unités de production, la productibilité hydraulique moyenne etc.

Ceci permet d'utiliser le modèle dans le cadre de l'aide à la conception des bâtiments et des quartiers : la cohérence est assurée entre les données d'entrée utilisées (données météorologiques type en particulier) ; le modèle moyenne les aléas des années réelles

²² <http://www.rte-france.com/fr/developpement-durable/eco2mix>

(disponibilité des ressources en eau pour la production hydraulique, baisse de disponibilité due à un aléa sur une centrale nucléaire, vague de froid ou canicule...).

Le modèle final donne pour chaque heure une production électrique représentative du fonctionnement actuel du système par rapport à une demande donnée. Il est possible d'étudier la sensibilité du mix par rapport aux paramètres intégrés comme les capacités installées ou le productible hydraulique²³ pour simuler des aléas (année sèche ou pluvieuse par exemple).

Quatre indicateurs sont utilisés pour mesurer la qualité de la modélisation. Ils sont définis dans le Tableau 8 pour une série de n variables réelles x et une série de n variables modélisées y.

Tableau 8 : Indicateurs de performance de la modélisation

Nom	Abbréviation	Equation
Biais (Mean biased error)	MBE	$BIAIS(x, y) = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)$
Erreur Absolue Moyenne (Mean absolute error)	MAE	$MAE(x, y) = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i - y_i $
Erreur Absolue Relative (Mean absolute percentage error)	MAPE	$MAPE(x, y) = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left \frac{x_i - y_i}{x_i} \right \times 100$
Erreur quadratique moyenne (Root mean square error)	RSME	$RSME(x, y) = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i - y_i ^2}$
Coefficient de corrélation	COR	$COR(x, y) = \frac{\sum_h (x(h) - \bar{x}) \times (y(h) - \bar{y})}{\sqrt{\sum_h (x(h) - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_h (y(h) - \bar{y})^2}}$

Le biais représente l'erreur globale sur l'année. Il évalue si le modèle a tendance à sur ou sous-estimer la variable (consommation ou production) à modéliser. L'erreur absolue moyenne représente la moyenne des écarts absolus entre valeurs réelles et valeurs modélisées. L'erreur absolue relative représente l'erreur absolue moyenne relative. Le coefficient de corrélation permet d'apprécier si les variations de la variable modélisée sont bien représentées. Il est égal à 1 lorsque la variable modélisée est une fonction linéaire de la variable réelle. L'erreur quadratique moyenne, RMSE (Root Mean Square Error) pénalise de façon importante les gros écarts de modélisation. L'objectif est ici de représenter le fonctionnement moyen du système électrique. Des événements ponctuels et aléatoires peuvent intervenir et générer des erreurs sans que la validité du modèle soit remise en cause. Or la RMSE augmente l'influence de ce type d'erreur par rapport aux autres indicateurs présentés. Elle doit être utilisée avec précautions.

²³ Selon la définition de RTE, « l'énergie productible est celle qui serait tirée des apports naturels si les usines étaient exploitées en permanence dans les conditions optimales. Elle est estimée à partir des débits d'apports en moyenne sur une longue période » (RTE, 2012)

Tableau 9 : Données utilisées

Données	Année réelle 2012	Année réelle 2013	Année réelle 2014	Année type	Prévision Année type
Description des données	Données horaires, source RTE	Données horaires, source RTE	Données horaires, source RTE	Données horaires, modélisation	Données annuelles, source RTE
Calibrage des paramètres de modélisation	X	X			
Validation de la production annuelle totale				X	X
Validation des sous-modèles		X	X		
Validation du modèle complet			X		

Différents horizons temporels sont utilisés dans le cadre de la modélisation. Certaines productions peuvent par exemple être déterminées sur les heures de la semaine, ou les heures de l'année. Les indices et sous-indices utilisés sont listés et définis dans le Tableau 10. La ligne donne l'indice principal et la colonne donne le sous-indice : h_d représente les heures du jour (de 0 à 24) et d_y représente les jours de l'année (de 0 à 365). Les indices non utilisés sont indiqués par un tiret.

Tableau 10 : Liste des indices et sous-indices temporels

	Jour/Day (d)	Semaine/week (w)	Mois/month (m)	Année/year (y)
Heure/hour (h)	h_d	h_w	h_m	h_y
Jour/Day (d)		d_w	d_m	d_y
Semaine/week (w)			-	w
Mois/month (m)				m
Saison/season (s)				s

2.3. LA DEMANDE À SATISFAIRE

La demande à satisfaire constitue l'entrée du modèle de production. Elle est représentée par une série annuelle d'appels de puissance horaire sur le système électrique. Elle comprend : la consommation finale nationale (métropole, Corse exclue), la demande extérieure (exports) et la consommation des stations de pompage. Les pertes en lignes sont incluses dans la consommation nationale.

Les exports ainsi que le pompage doivent donc être modélisés de façon différenciée de la consommation nationale. Une augmentation de la consommation nationale peut avoir comme effet une diminution des exportations. L'ajout massif d'usages sur les heures d'appel des stations de pompage (creux de nuit) peut également entraîner une hausse des prix et modifier la gestion des STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage).

Les paragraphes suivants explicitent comment ont été modélisés la consommation nationale, les échanges aux frontières ainsi que le pompage des STEP.

2.3.1. Consommation nationale

La consommation en électricité est influencée par de nombreux paramètres : la météorologie (température, nébulosité), l'activité économique (jours ouvrés, vacances), les offres d'effacement, le changement d'heure ou encore les événements exceptionnels (une finale de coupe du monde de football par exemple). Sur une perspective de long terme, les changements d'usages (véhicules électriques, pompes à chaleur, etc.) et la conjecture économique influencent également l'évolution de la consommation²⁴.

Le but du modèle développé est de représenter la production satisfaisant la consommation actuelle d'électricité, suivant les usages en cours. La nébulosité, les offres d'effacements ainsi que les événements exceptionnels sont négligés dans un premier temps.

Les paramètres pris en compte sont :

- Une température nationale de référence (T_{nat}) calculée sur la base d'une moyenne des températures conventionnelles des zones de la réglementation thermique (RT2012)²⁵ pondérée par des coefficients issus du questionnaire de réseau RTE²⁶.
- Un gradient thermique d'hiver moyen g_h de 2366 MW/°C, variable selon les heures de la journée (de 2095 à 2618 MW/°C), considéré quand la moyenne journalière de la température nationale ($\overline{T_{nat}}$) est en dessous du seuil $T_{seuil-hiver}$. La valeur du gradient

²⁴<http://www.rte-france.com/fr/nos-activites/notre-expertise/equilibre-offre-demande/les-previsions-de-consommation>

²⁵<http://www.rt-batiment.fr/batiments-neufs/reglementation-thermique-2012/donnees-meteorologiques.html>

²⁶<http://www.rte-france.com/fr/actualites-dossiers/a-la-une/avec-la-contribution-de-meteo-france-rte-met-a-jour-son-referentiel-national-de-temperatures> : Les différents poids considérés sur les 32 stations ont été sommés par zone climatique pour avoir un coefficient de pondération par zone.

thermique d'hiver est restée constante entre 2013 et 2014 selon RTE²⁷. Elle est déterminée sur la base des données de 2013 en considérant la valeur de la consommation par rapport à une moyenne glissante en température sur les 72 heures précédentes. L'ensemble des valeurs est donné en Annexe D.

- Un gradient thermique d'été g_e de 500 MW/C° considéré quand la moyenne journalière de la température nationale ($\overline{T_{nat}}$) est au-dessus du seuil $T_{seuil-été}$.
- Une puissance horaire appelée « de base » C_{base} représentant la moyenne annuelle de la consommation non thermosensible. La détermination de la valeur de cette puissance est expliquée dans le paragraphe 2.3.1.2.
- Un coefficient mensuel $\alpha(m)$ de modulation de C_{base} , représentant la variation de la consommation des secteurs industriels, transport et agriculture.
- Un coefficient journalier $\beta(d_w)$ de modulation de la puissance moyenne représentant la variation des autres activités économiques au cours de la semaine (jours ouvrés, week-end...).
- Un coefficient horaire de modulation de la puissance appelée $\gamma(h_d, d_w, s)$ différenciée selon les jours (7 distributions différentes, les jours fériés sont identifiés aux dimanches) et les saisons (pour tenir compte des changements d'heure en particulier). Il représente la variation de la consommation d'électricité sur la journée (éclairage, cuisine, etc.). La saison hivernale court du changement d'heure d'octobre à celui de mars.

On exprime alors la consommation nationale à l'heure h_d , au jour d_w , au mois m_y de la saison s comme une moyenne horaire de puissance appelée:

$$C_{FR} = C_{base} \times \alpha(m_y) \times \beta(d_w) \times \gamma(h_d, d_w, s) + g \times \Delta T \quad 2-1$$

Avec:

$$\Delta T = |\overline{T_{nat}} - T_{seuil}| \text{ où } T_{seuil} = T_{seuil-hiver} \text{ si } T_{nat} < T_{seuil-hiver} \text{ et } T_{seuil} = T_{seuil-été} \text{ si } T_{nat} > T_{seuil-été}, g = g_h \text{ si } T_{nat} < T_{seuil-hiver} \text{ et } g = g_e \text{ si } T_{nat} > T_{seuil-été}$$

Le processus de modélisation est résumé sur la figure ci-dessous en prenant pour exemple le cas d'un lundi de février.

²⁷ http://www.rte-france.com/sites/default/files/bilan_electrique_2014.pdf

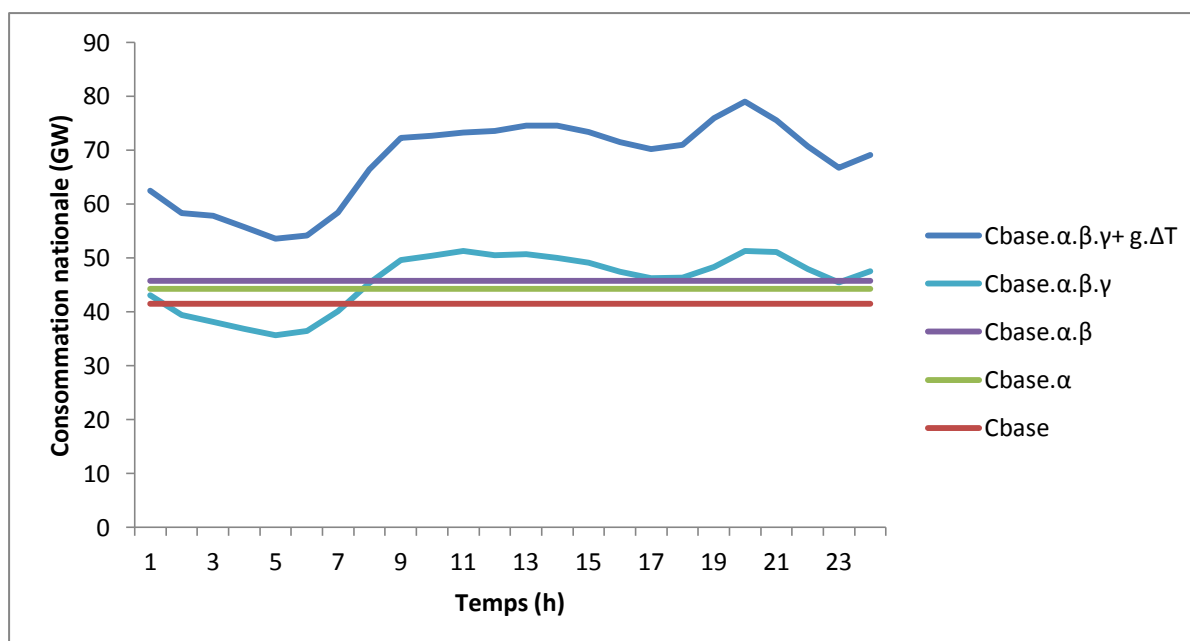


Figure 12 : Détermination de la consommation nationale

C_{base} représente la moyenne annuelle de la puissance horaire appelée non thermosensible. Cette moyenne annuelle appelée est modulée sur les mois par le coefficient $\alpha(m_y)$. Le produit $C_{base} \times \alpha(m_y)$ correspond donc à une moyenne mensuelle de puissance horaire appelée. Cette moyenne mensuelle multipliée par le coefficient $\beta(d_w)$ pour chaque jour de la semaine (lundi à dimanche et jours fériés) donne une moyenne journalière de puissance appelée. Une fois la moyenne journalière déterminée, on lui applique la distribution correspondant au jour de la semaine de la saison considérée, représentée par les coefficients $\gamma(h_d, d_w, s)$. On ajoute ensuite l'effet thermosensible $g \times \Delta T$.

Les paramètres du modèle sont calibrés sur l'année 2012 puis validés sur l'année 2013. Les paragraphes suivants reviennent sur la détermination de la température nationale de référence, de la puissance de base, l'optimisation des différents coefficients et enfin les résultats du modèle de référence.

2.3.1.1. TEMPÉRATURE NATIONALE "TYPE"

Pour calculer la température nationale de référence en cohérence avec la simulation thermique-dynamique des bâtiments, nous avons choisi d'utiliser les données « type » de températures de la réglementation thermique 2012²⁸ qui considère 8 zones climatiques pour la France, comme montré sur la Figure 13.

²⁸<http://www.rt-batiment.fr/batiments-neufs/reglementation-thermique-2012/donnees-meteorologiques.html>



Figure 13 : Zones de la réglementation thermique 2012

On relie ces 8 zones avec les 32 stations sur lesquelles se base le gestionnaire du réseau de transport d'électricité (RTE). RTE publie sur son site des coefficients de pondération pour les 32 stations en fonction des foyers de consommation (population, activité économique...). Le tableau des coefficients de pondération est donné en Annexe C.

Le regroupement des 32 stations sur les 8 zones thermiques et l'addition de leur coefficient de pondération donne les coefficients de pondération par zone climatique RT 2012. Ils sont présentés dans le Tableau 1 suivant.

Tableau 11 : Température nationale: Coefficient de pondération par zone thermique

H1a	H1b	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3	
30	9	15,2	8,4	12,6	9,6	1,2	14	100

La Figure 11 montre le résultat du calcul de la température nationale « type » comme moyenne pondérée des données météorologiques types données par la réglementation thermique pour chaque zone thermique.

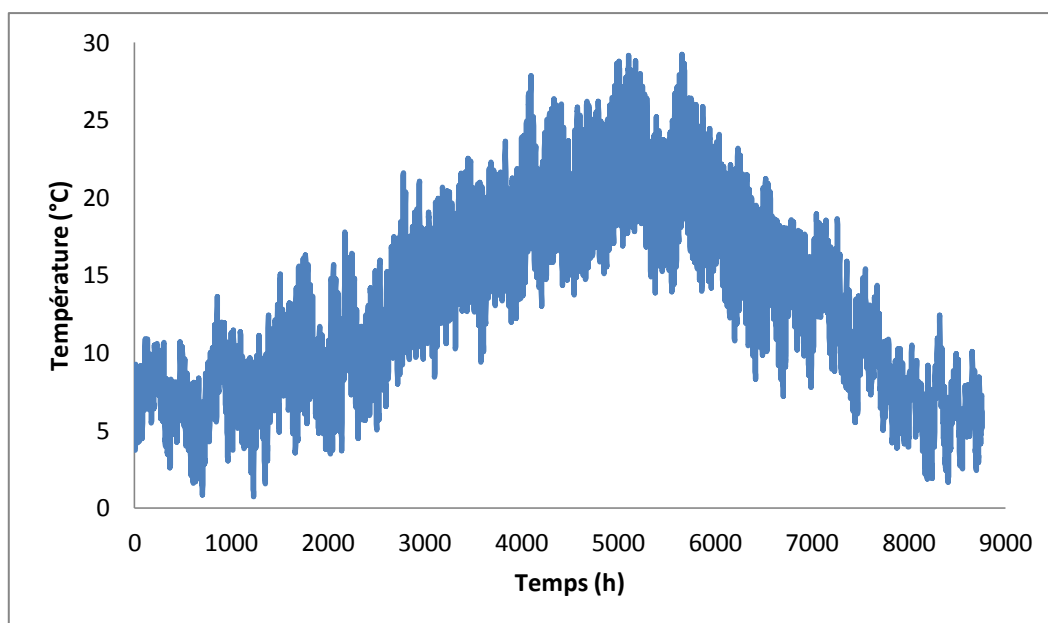


Figure 14 : Température nationale "type"

2.3.1.2. PUISSANCE DE BASE

On cherche ici à représenter la variation de la consommation au cours de l'année, suivant ces différentes périodicités. Cependant, la consommation totale est également fortement impactée par la conjoncture économique, problématique qui n'est pas abordée ici. La quantité totale d'énergie consommée sur l'année est donc considérée comme une valeur exogène, extraite des valeurs de RTE.

La puissance de base c_{base} en 2012 est évaluée à 46,4 GW et à 45,5 GW pour 2013. La puissance de base du modèle de référence correspond à la moyenne de ces deux valeurs : 46,1 GW

2.3.1.3. DÉTERMINATION DES COEFFICIENTS

Les coefficients $\alpha, \beta, \gamma, T_{seuil-hiver}, T_{seuil-été}$ sont obtenus par optimisation contrainte non linéaire en utilisant une méthode de point intérieur (Byrd et al., 1999). L'optimisation est faite sur l'année 2012. Les coefficients mensuels, journaliers et horaires sont optimisés successivement. L'optimisation est basée sur la minimisation de l'erreur moyenne absolue (MAE) entre valeurs réelles et valeurs modélisées. En considérant les coefficients optimisés et une valeur de la puissance de base pour 2012 de 46,4 GW, on obtient un facteur de corrélation entre données modélisées et données mesurées (RTE) de 0,98 et une erreur moyenne relative (MAPE) de 3,5 %.

Les coefficients optimisés sont ensuite utilisés pour valider le modèle sur l'année 2013, en considérant la température nationale de référence et le calendrier spécifique à cette année. Après optimisation de la puissance de base afin de se ramener à un volume consommé sur l'année équivalent, on obtient une erreur relative moyenne de 3,8 % avec un facteur de corrélation (COR) de 0,98.

Le modèle est considéré comme validé car le coefficient de corrélation et l'erreur moyenne sont peu dégradés entre les deux années (calibration et validation) et l'erreur moyenne relative (MAE) reste inférieure à 5 % pour les deux années.

L'ensemble des coefficients est présenté en Annexe E. La valeur des températures seuil est de 15 °C pour l'hiver et 18 °C pour l'été.

2.3.2. Résultats de la modélisation

La Figure 15 montre la consommation calculée différenciée en deux composantes : une part indépendante de la température (bleue), la part thermosensible (rouge et vert). On constate l'importance de la thermo-sensibilité d'hiver (rouge) alors que la thermo-sensibilité estivale (verte) est beaucoup plus discrète.

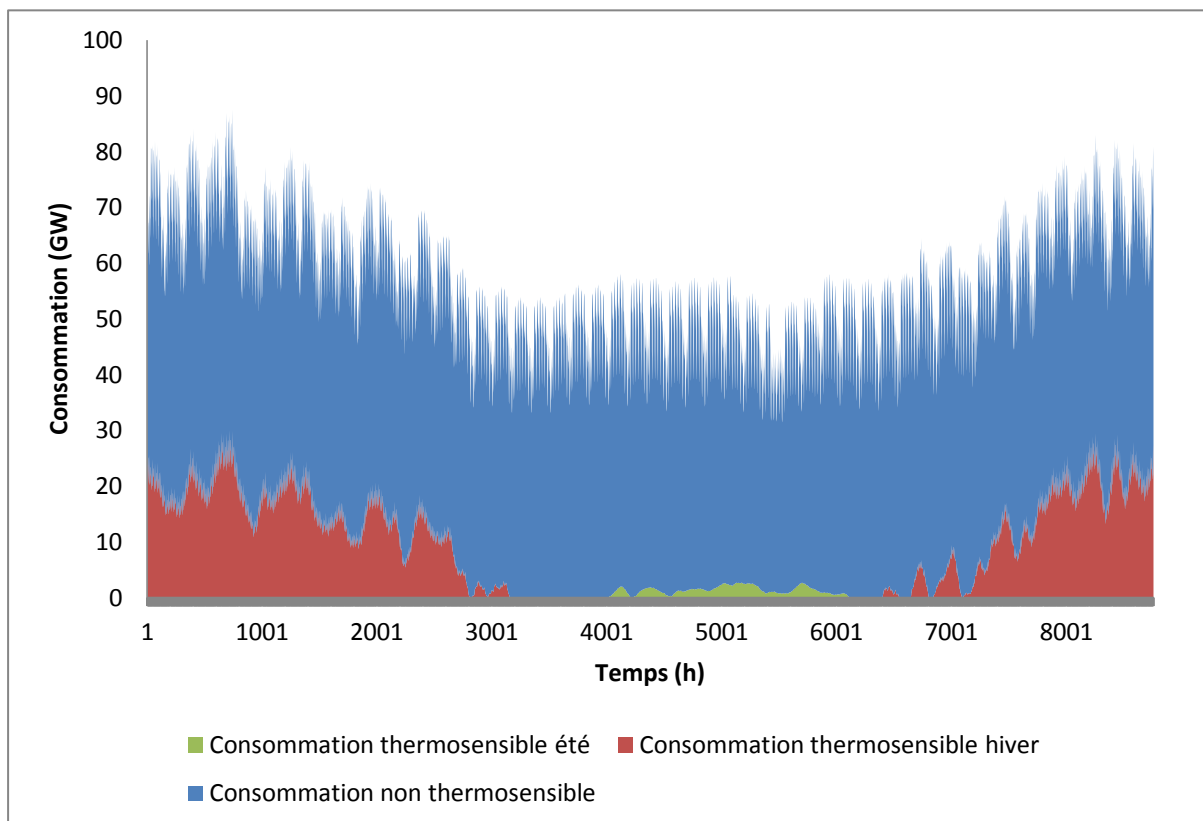


Figure 15 : Consommation nationale "type", part thermosensible et part non thermosensible

La consommation thermosensible hivernale représente 73 TWh sur l'année contre 3 TWh pour la consommation thermosensible estivale, soit respectivement 15 % et moins de 1 % du total de la consommation nationale.

2.3.3. Modélisation des échanges aux frontières

2.3.3.1. DESCRIPTION

La modélisation des échanges transfrontaliers est complexe car elle dépend de nombreux facteurs qui ne sont pas accessibles, notamment des données sur le marché européen SPOT où s'échange l'électricité. Non seulement le prix de l'électricité n'est pas donné en France mais en plus il varie en continu, ce qui en fait un paramètre difficile à intégrer à un modèle de mix électrique « type ».

La France exporte beaucoup d'électricité car son prix est l'un des plus bas du marché européen (le coût estimé du démantèlement des anciennes centrales nucléaires et du stockage à long terme des déchets étant moindre que dans d'autres pays). Sur l'ensemble des heures de 2012 et 2013, la France est exportatrice nette pour 94 % du temps. Cependant, lorsque la consommation devient trop importante, en hiver notamment, la tendance s'inverse à cause notamment de la forte thermo-sensibilité de la demande française en comparaison des pays voisins. Cela n'a concerné que 6 % des heures de 2012-2013.

Suite à l'analyse des données historiques, des documents de RTE, les tendances suivantes ont été relevées :

- Le niveau d'export est lié à la disponibilité des centrales nucléaires et au charbon (coût marginal faible), voire de la filière gaz.
- La production PV en France est corrélée à la production PV des voisins européens. Sans information sur l'éolien, on considère dans le doute un lien entre production éolienne nationale et étrangère, même s'il est faible.
- Le niveau d'export est lié de façon non intuitive à la consommation restante (corrélation linéaire faible). Si celle-ci dépasse un certain seuil (autour de 80 GW aujourd'hui, comme illustré sur la Figure 16), la France devient importatrice quels que soient le jour ou l'heure considérés. En dessous d'une consommation restante de 40 GW, la France est toujours exportatrice nette.
- Le niveau d'export maximal est fixé à 15 GW. Les capacités hivernales française d'export sont actuellement d'un peu plus de 14 GW selon le bilan prévisionnel 2014 de RTE, et elles sont amenés à augmenter jusqu'à plus de 16 GW à l'horizon 2019.

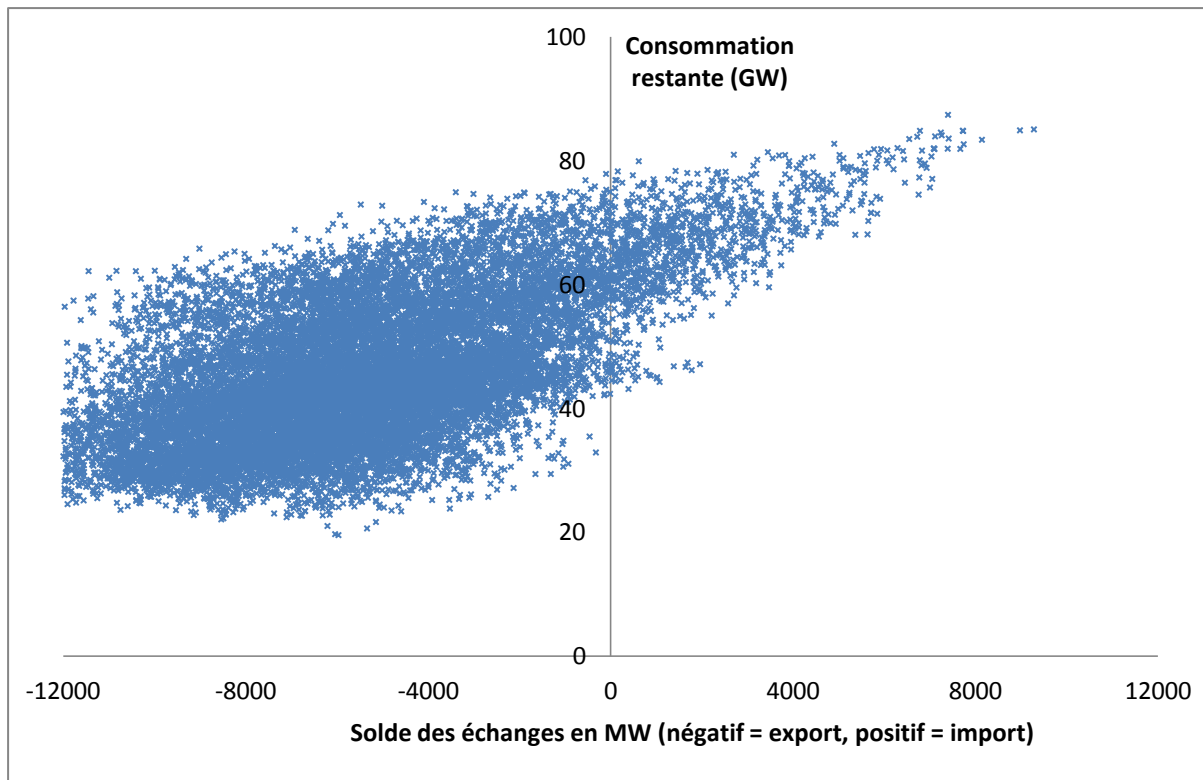


Figure 16 : Consommation restante (consommation nationale moins productions fatales) 2012-2013 en fonction du solde des échanges

2.3.3.2. MODÉLISATION

Le modèle de mix électrique développé ici doit rester simple et accessible. La modélisation des exports tient compte des disponibilités nucléaires (mais pas des disponibilités gaz et charbon, rarement saturées), du niveau de consommation nationale, de la température nationale ainsi que des productions solaires et éoliennes françaises. Ces dernières ont un double effet : elles donnent un aperçu très sommaire de la production renouvelable dans les pays voisins, donc contribuent à diminuer la demande mais augmentent la capacité de la France à exporter.

Étant donnée la complexité des liens entre ces paramètres, l'approche par réseaux de neurones artificiels a été retenue. Elle est appliquée dans le cas de problèmes complexes non-linéaires. Elle a été utilisée avec succès pour la prévision de production d'électricité à court terme (Hippert et al., 2001) et plus récemment pour l'évaluation des prix de l'électricité (Catalão et al., 2007). Elle permet de générer un niveau d'échange (solde des échanges) dépendant des paramètres précités, notamment la demande résiduelle (consommation nationale moins productions fatales) sans définir explicitement de règles de décision. C'est un modèle de type boîte noire. Les réseaux de neurone fonctionnent par induction. Durant la phase d'apprentissage, ils construisent un système de décisions reliant les entrées aux sorties à partir de couples entres-sorties connus. Le modèle est cohérent avec les niveaux historiques, mais il n'est pas basé sur une approche physique.

Le diagramme entrée-sortie du modèle est présenté sur la Figure 17.

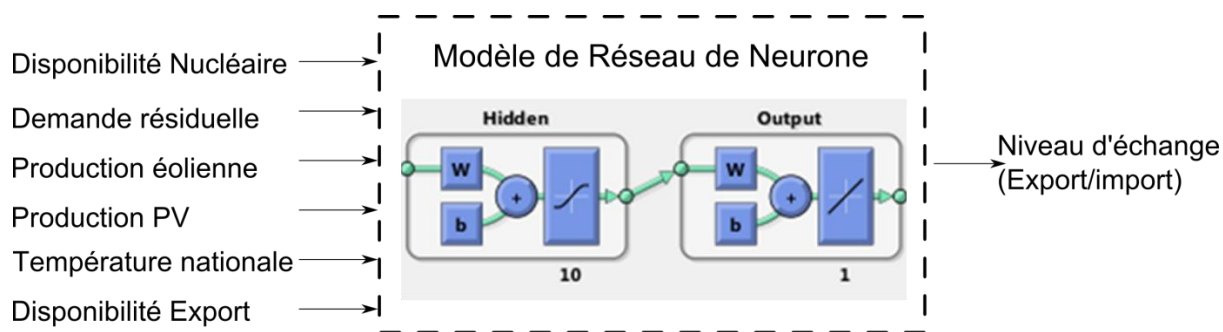


Figure 17 : Diagramme Entrée-Sortie - Modèle Export

Le réseau de neurone utilisé est un réseau « *feed-forward* » qui comprend 6 entrées (Disponibilité nucléaire, Demande résiduelle, Production éolienne, Production PV, Température nationale, Disponibilité export), 2 couches et 10 neurones par couche. Le modèle a été calibré sur 2012 (phase d'apprentissage), testé sur 2013 et affiche des coefficients de corrélation avec les données réelles de 0,87 pour 2012 et 0,83 pour 2013. Cela a été jugé suffisamment précis par rapport au modèle développé, sachant que la demande en export représente autour de 10 % de la demande totale, suivant les années.

De même que pour la consommation nationale, le modèle vise à représenter la variation des niveaux d'échanges sur une année. Cependant, le niveau d'échange global dépend de paramètres économiques qui ne sont pas inclus dans la modélisation. Ainsi, sur 2013, si le coefficient de corrélation entre valeurs réelles et valeurs calculées est satisfaisant (0,83), le solde total des échanges calculé sur l'année est supérieur de 15 % à la valeur réelle.

A partir du niveau d'export indiqué pour une année type dans le rapport prévisionnel de RTE, la courbe des échanges sur l'année est translatée d'un facteur égal à la différence entre la moyenne des échanges calculés et prévus, comme illustré sur la Figure 18.

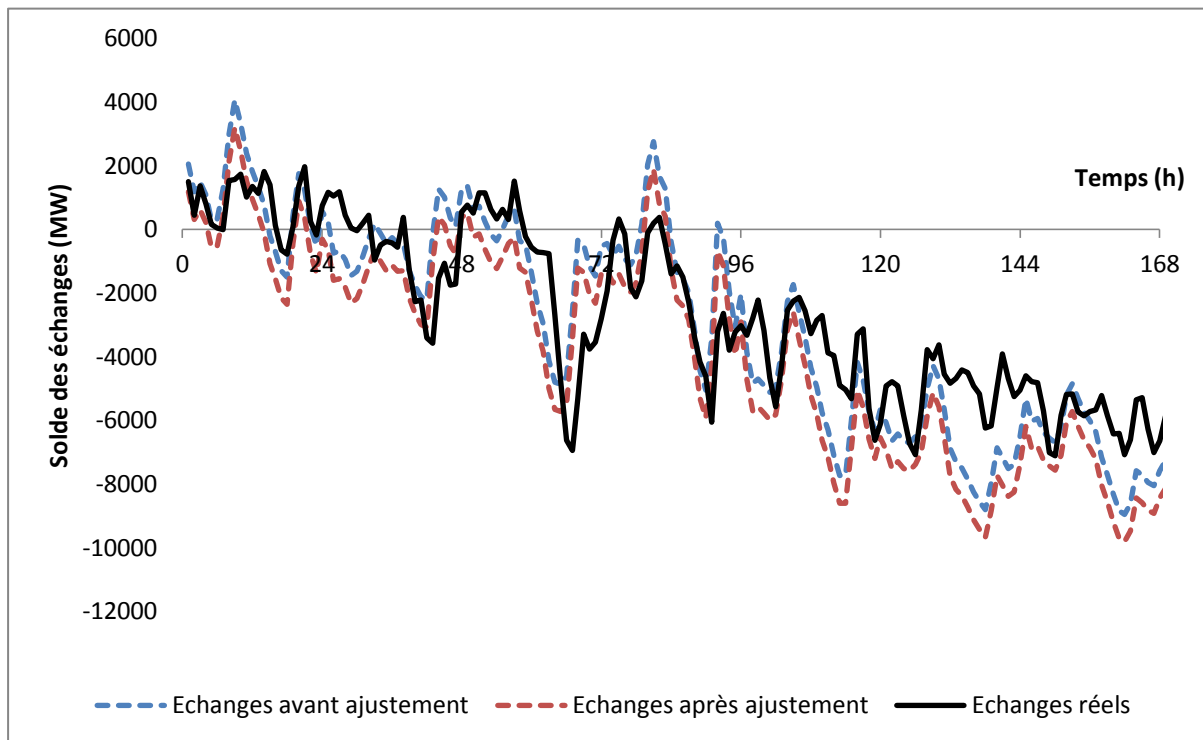


Figure 18 : Niveau des échanges aux frontières (<0 : Export, >0 : Import), première semaine de mars 2013

La procédure de translation est retenue car elle ne dégrade pas le facteur de corrélation mais élimine le biais du modèle. La figure 9 ci-dessous présente la modélisation sur l'année 2013 des échanges aux frontières, comparée avec le niveau réel d'échanges observé. Même si l'erreur moyenne reste importante (de l'ordre de 1496 MW sur 2013), on constate que le modèle représente bien la variation du niveau d'échange au cours de l'année, bien que les exports estivaux soient légèrement sous-estimés.

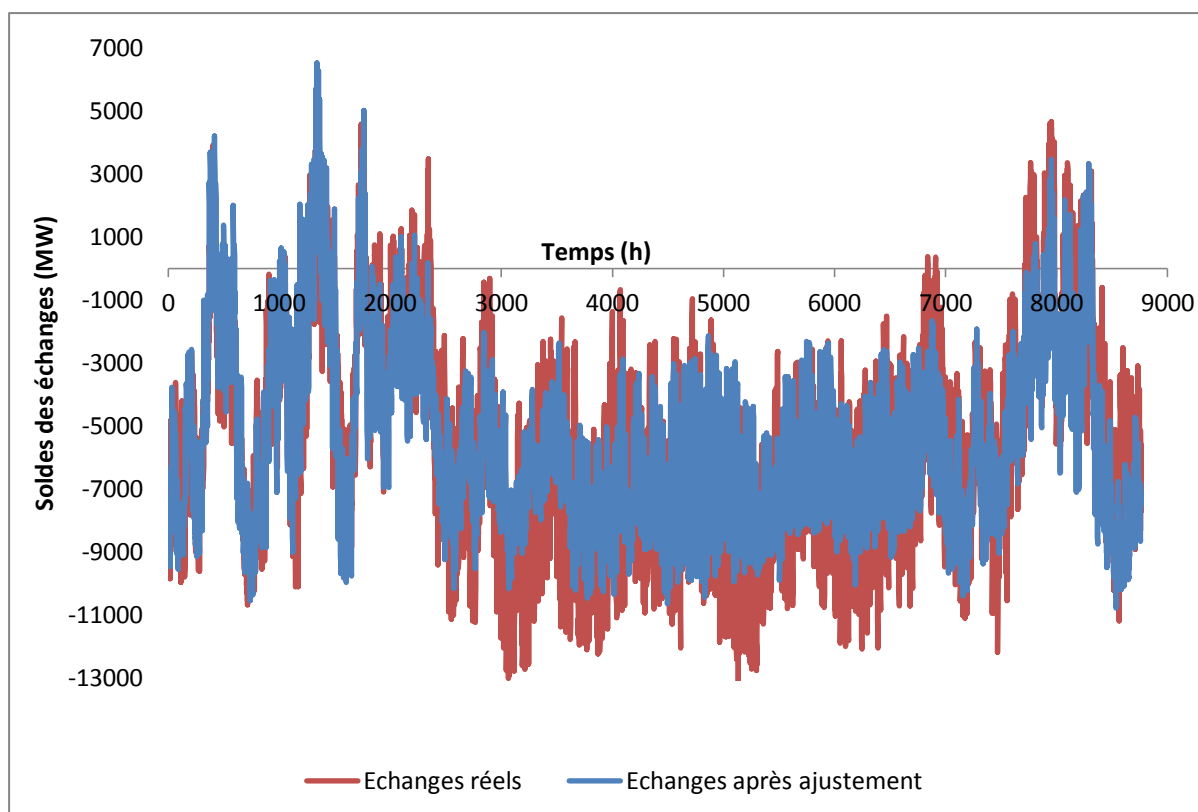


Figure 19 : Modélisation des échanges, validation sur 2013

La quantité d'énergie totale échangée sur l'année est donc considérée comme une valeur exogène. Pour la définition du mix type, on se base sur les prévisions de RTE. Ces prévisions ont été effectuées en fonction des capacités installées prévues pour 2014 et d'un climat type. Le niveau des échanges prévu par RTE, selon les capacités installées prévues et pour un climat type, est de 62,6 TWh exportés. Après un premier calcul grâce au modèle de réseau de neurones, la valeur horaire du niveau d'échange (en W) est ajustée selon la procédure de translation définie plus haut, afin de retrouver la valeur totale de 62,6 TWh exportés.

2.3.4. Modélisation du pompage des STEP

2.3.4.1. DESCRIPTION

Les stations de transfert par pompage sont utilisées pour lisser la courbe de charge. Durant les heures creuses, les stations pompent de l'eau qu'elles vont pouvoir turbiner lors des heures les plus chargées de la journée, ce qui aide à optimiser le fonctionnement des centrales thermiques et des centrales nucléaires.

Les stations de pompage contribuent en outre au réglage de la tension ou de la fréquence du système électrique, ou au secours en cas de problème sur le réseau (réserve).

4200 MW de puissance de pompage sont installés sur le territoire français²⁹. Ces stations très réactives peuvent produire à pleine puissance en quelques minutes.

La majorité des STEP fonctionnent sur une périodicité journalière. Les données historiques de consommation en pompage sont disponibles pour 2012 et 2013. Sur la Figure 20 et la Figure 21, on peut observer le motif de fonctionnement du pompage sur une semaine type du mois de mars 2012. Les stations pompent en priorité sur les heures du creux de nuit durant la semaine, et de façon plus étendue le week-end, où la consommation est plus basse.

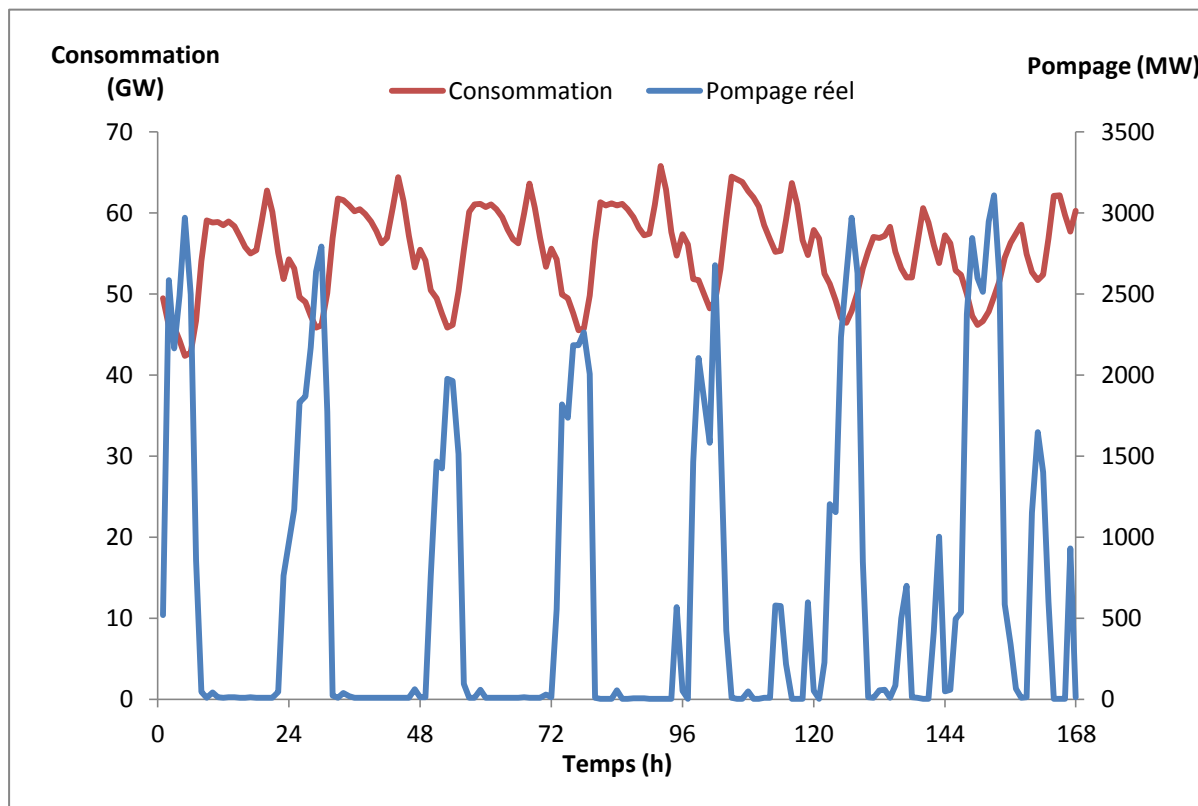


Figure 20 : Appel des STEP en pompage et consommation nationale sur une semaine fin Janvier 2012

2.3.4.2. MODÉLISATION

La principale fonction du pompage est de lisser la courbe de charge en pompant aux heures creuses pour turbiner aux heures de pointe. C'est ce comportement que l'on cherche à reproduire. D'autres phénomènes peuvent intervenir comme l'utilisation du pompage pour la stabilité du réseau, mais ils restent marginaux et ne seront pas considérés ici.

En analysant les données réelles, on extrait les comportements suivants :

- Le pompage fonctionne sur une base journalière et de façon systématique au moment du minimum journalier (creux de nuit, vers 5 h du matin)
- Il monte et descend en puissance très rapidement
- Le pompage est plus important sur les week-ends, où la consommation est plus basse

²⁹ http://ecolo.org/documents/documents_in_french/STEP-en-France-Ursat-2011.pdf

La disponibilité journalière D_{STEP} des STEP n'est pas disponible directement. Elle est approximée par la disponibilité des centrales de « lac+STEP » $D_{Lac+STEP}$ (soit une capacité installée $K_{Lac+STEP}$ de 13,4 GW) recalée en proportion de la capacité installée des STEP K_{STEP} (4,2 GW). La disponibilité du groupe de centrales lac+STEP $D_{Lac+STEP}$ est donnée par RTE en valeur journalière pour les années 2010 à 2013. On définit donc la disponibilité journalière des STEP selon l'équation suivante:

$$D_{STEP} = \left(\sum_{y=2010}^{2013} D_{Lac+STEP_y} \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{K_{Lac+STEP}} \right) \times K_{STEP} \quad 2-2$$

Puis on choisit de tenir compte des paramètres suivants:

- Moyenne hebdomadaire de la demande résiduelle pour discriminer les jours ouvrés et les week-ends par leur différence de consommation : le pompage est directement mis à zéro sur les heures où la demande résiduelle $Res(h_w)$ dépasse la moyenne hebdomadaire. Pour la semaine w (de 1 à 52), la moyenne hebdomadaire sur les heures h_w (de 1 à 168) est définie par :

$$\overline{Res(w)} = \frac{\sum_{h_w} Res(h_w)}{168} \quad 2-3$$

- La demande résiduelle $Res(h_w)$ considérée est la consommation nationale à laquelle on a soustrait les productions fatales (voir paragraphes suivants).
- Ecart de consommation au minimum journalier $Min_{d_y}(Res(h_d, d_w))$: plus on s'écarte du minimum, plus la puissance du pompage décroît. L'écart au minimum peut s'exprimer soit par un ratio du minimum journalier sur la consommation restante, soit par une différence : consommation – minimum journalier.
- Disponibilité des équipements, donnée pour chaque jour de l'année : D_{STEP} .

A partir du maximum de pompage, situé au niveau du minimum journalier et représenté par le produit de la disponibilité et du coefficient d'utilisation, on cherche un facteur exprimant la décroissance forte du pompage lorsqu'on s'éloigne du minimum. Ce facteur dépend donc du minimum journalier et de la consommation à l'heure h . Il est égal à 1 lorsque la consommation est égale au minimum et décroît fortement lorsqu'on s'éloigne du minimum.

On cherche donc une fonction F qui permette de représenter la consommation d'électricité du pompage $C_{STEP}(h_d, d_y)$ de la façon suivante :

$$\begin{aligned} & Si \ Res(h_d, d_w) < \overline{Res(w)} \\ & C_{STEP}(h_d, d_y) = D_{STEP}(d_y) \times F(h_d) \\ & Sinon, \ C_{STEP}(h_d, d_y) = 0 \end{aligned} \quad 2-4$$

Soit une fonction $y=F(x)$, décroissante sur $[0, \frac{Min_{d_y}(Res(h_j, d_y))}{\overline{Res(w)}}]$ (sur les heures où le pompage est non nul), avec les variables :

$$y = \frac{C_{STEP}(h_d, d_y)}{D_{STEP}(d_y)} \text{ et } x_1 = \frac{Min_{d_y}(Res(h_d, d_y))}{Res(h_d, d_y)} \text{ OU } x_2 = (Res(h_d, d_y) - Min_{j_3}(Res(h_d, d_y)))$$

On cherche à identifier un modèle pour représenter F. Il est possible d'utiliser entre autres une fonction puissance, une fonction exponentielle ou une fonction tangente hyperbolique :

$$y = (x_1)^n ; y = \exp^{-m(x_2)} ; y = (1 - \tanh(-l(x_2)))$$

Les différentes fonctions F ont été testées et leurs paramètres identifiés (n, m et l) par maximisation du coefficient de corrélation entre données réelles et données calculées sur 2013.

La figure 17 ci-dessous montre le calcul de Y suivant les trois expressions de F en comparaison avec les valeurs réelles (Y).

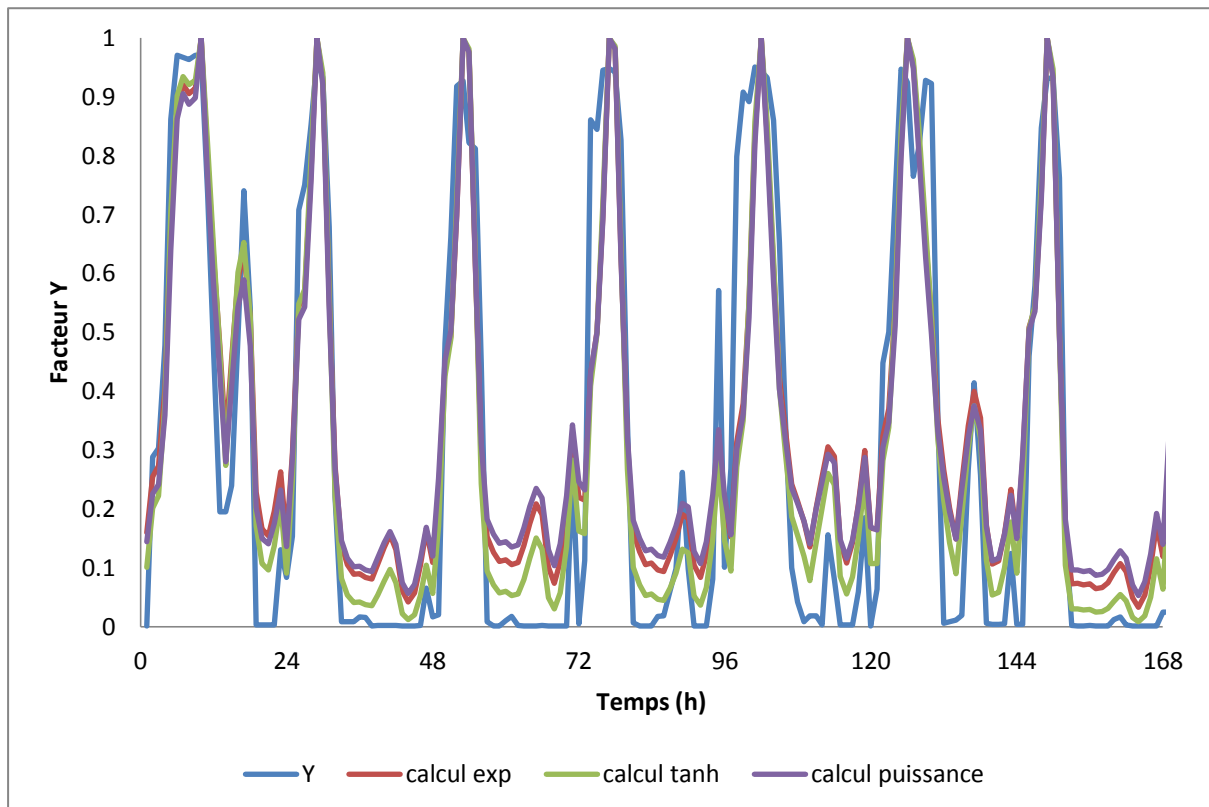


Figure 21 : Y (valeur réelle 2013) et les trois modèles F(X) pour approcher Y

La fonction tangente hyperbolique a été retenue avec un paramètre $l = 0,00011$ car sa performance en termes de coefficient de corrélation (correspondance entre la distribution des valeurs réelles et calculées : 0,88) et d'erreur totale sur l'année (différence entre consommation totale du pompage en TWh réelle et calculée < 3 %) est la plus élevée.

Ce modèle a été appliqué à l'ensemble de l'année 2014 pour validation et le coefficient de corrélation entre données réelles et données mesurées est de 0,87. Il n'y a pas de dégradation significative du facteur de corrélation entre les deux années. Une incertitude pèse sur la capacité installée à considérer pour cette année. Le parc des STEP était estimé à 4,3 GW dans le Bilan Prévisionnel 2012 de RTE et une capacité installée de plus de 4,9 GW est

indiquée pour 2015 sur le site de RTE³⁰. Il faut en fait distinguer les capacités de turbinage et de pompage, qui ne sont pas équivalentes. On considère une capacité de pompage de 4,2 GW et une capacité de turbinage de 4,9 GW, selon les informations d'EDF³¹. En considérant pour 2014 une capacité installée de 4,6 GW (soit la moyenne entre les deux valeurs), le modèle donne sur l'année une consommation de pompage de 8,09 TWh contre 8,08 TWh enregistré par RTE.

Ce modèle est considéré comme suffisamment précis par rapport à son usage, la consommation des STEP représentant moins de 2 % de la demande totale en électricité.

2.4. MODÉLISATION DES MOYENS DE PRODUCTION

2.4.1. Généralités sur le système électrique français

Le système électrique français est un ensemble de plusieurs centaines de groupes de production cumulant plus de 120 GW de puissance installée. Ces unités de production sont reliées par un réseau de transport (haute tension géré par RTE) puis un réseau de distribution (basse tension, géré par ERDF). Ce réseau possède lui aussi des contraintes propres, notamment de congestion et de pertes en ligne, qui influence la demande (consommation supplémentaire due aux pertes en ligne, variables sur l'année) et la production (certaines unités ne peuvent pas injecter sur le réseau si celui-ci est saturé à proximité). Les paragraphes suivants analysent les unités de production de ce système afin de pouvoir modéliser leur comportement en fonction de la demande.

La structure du parc de production de référence est basée sur les capacités installées prévues pour 2014 dans le bilan prévisionnel RTE 2013 et reportées en Annexe G. Le changement par rapport au précédent bilan effectué en 2012 est également rapporté, et on peut constater que la prévision des capacités installées peut être un exercice difficile, même à court terme : le parc thermique décentralisé a été revu substantiellement à la hausse, tout comme le charbon et contrairement au gaz.

Les prévisions sur les capacités installées sont également disponibles pour les années suivantes et peuvent être utilisées dans le modèle.

³⁰ http://clients.rte-france.com/lang/fr/visiteurs/vie/prod/parc_reference.jsp

³¹ http://ecolo.org/documents/documents_in_french/STEP-en-France-Ursat-2011.pdf

2.4.2. Productions fatales

2.4.2.1. DESCRIPTION DU PARC

La production fatale est constituée de l'hydraulique au fil de l'eau, de la production éolienne et de la production photovoltaïque. La production thermique décentralisée est également incluse dans cette catégorie car elle n'est pas modulée en fonction de la demande sur le réseau mais de contraintes locales (chauffage urbain, incinération de déchets...). Elle est considérée comme une production fatale par le gestionnaire du réseau, RTE³². Elle est principalement composée de centrales de cogénération (gaz, fioul, UIOM, biomasse, gaz industriels, géothermie).

Ces centrales se classent en deux catégories: celles dont la production varie en fonction de paramètres environnementaux (vents, ensoleillement ou précipitations) et dont la production est donc facilement prévisible d'un jour sur l'autre grâce à la prévision météorologique et celles dont la prévision de production est plus complexe car dépendant de variables économiques exogènes (p. ex. cogénération en fonction d'une activité industrielle). L'ensemble des technologies fatales et des capacités installées et prévues est reporté dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Capacités installées des technologies fatales

En GW	Capacité installée début 2012 (MW)	Capacité installée fin 2012 (MW)	Capacité prévue en 2014 (MW)	Prévision
Hydraulique au fil de l'eau	7,6	7,6	7,6	Météo
Eolien	6,7	7,4	9,0	Météo
Photovoltaïque	2,4	3,5	5,1	Météo
Thermique ENR + Déchets	1,3	1,4	1,5	Var. Locales
Thermique fossile	6,9	6,5	5,6	Var. Locales

La catégorie « Thermique ENR + Déchets » regroupe des unités très hétérogènes : 774 MW d'incinération de déchets ménagers, 109 MW d'incinération de déchets de papeterie, 303 MW d'usine biogaz et 204 MW de biomasse (cogénération bois). La capacité installée en éolien et photovoltaïque peut progresser de façon importante au cours d'une année.

La catégorie thermique fossile est également assez hétérogène puisqu'elle regroupe des unités de puissance très différentes, de quelques dizaines de kW à plusieurs centaines de MW. En plus des groupes de cogénération qui constituent l'essentiel de cette catégorie, une

³² « Leur production [aux installations de production décentralisées] peut donc, dans le cadre économique actuel, être considérée comme fatale, c'est-à-dire indépendante des conditions de l'équilibre offre-demande et des prix de marché qui en résultent. » Bilan Prévisionnel de l'équilibre offre demande 2012, p68. (RTE, 2012)

capacité de 300 MW de groupe diesel est également incluse, ainsi que 600 MW de production d'origine inconnue de RTE (RTE, 2013b).

Le modèle de mix dynamique vise à examiner comment sont mobilisées les unités de production en fonction de la demande. Les unités fatales, qui sont par définition non modulables, constituent donc une donnée qu'il convient de déterminer de façon préliminaire. Il faut néanmoins faire un traitement des données disponibles afin d'extraire cette production et pouvoir la considérer comme une entrée du modèle. Dans la même logique que le travail sur une demande « de référence », il faudra ensuite déterminer une production fatale « de référence » à partir des capacités installées. Cette production de référence doit être cohérente avec les conditions climatiques de référence utilisées pour calculer la demande nationale en électricité, notamment concernant la production d'origine photovoltaïque ou éolienne qui dépendent essentiellement des facteurs climatiques.

2.4.2.2. ÉOLIEN

Grâce aux données horaires de production disponibles sur le site de RTE Eco2mix, il est possible de reconstituer pour 2012 et 2013 la variation du facteur de charge horaire. Il est important de tenir compte de la progression importante de la puissance installée sur ces deux années.

RTE donne pour chaque 1^{er} janvier la puissance installée. On considère une progression linéaire de la puissance installée entre janvier et décembre, en vérifiant que la production maximale sur le mois considéré est cohérente avec la puissance installée calculée. Les valeurs des puissances installées sont reportées dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Valeurs mensuelles des productions maximales et des Capacités éoliennes installées 2012-2013

2012/mois	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
P Eolien Max, MW	5670	4313	4713	5673	4060	4274	3704	4850	5621	4560	5607	6191
P Eolien, MW	6700	6732	6764	6795	6827	6859	6891	6923	6955	6986	7018	7400
2013/mois	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
P Eolien Max, MW	5749	5633	4616	5392	4215	4719	3722	2494	5743	6022	6049	6441
P Eolien MW	7500	7528	7557	7585	7614	7642	7670	7699	7727	7756	7784	8125

Le facteur de charge pour chaque heure de 2012 et 2013 est ensuite obtenu en divisant la production réelle observée à l'heure h du mois m $P_{eolien-réel}$ par la capacité installée K_{eolien} évaluée ci-dessus :

$$F_w(h, m) = \frac{P_{eolien-réel}(h, m)}{K_{eolien}(m)} \quad 2-5$$

Le résultat pour 2012 et 2013 est présenté sur Figure 22.

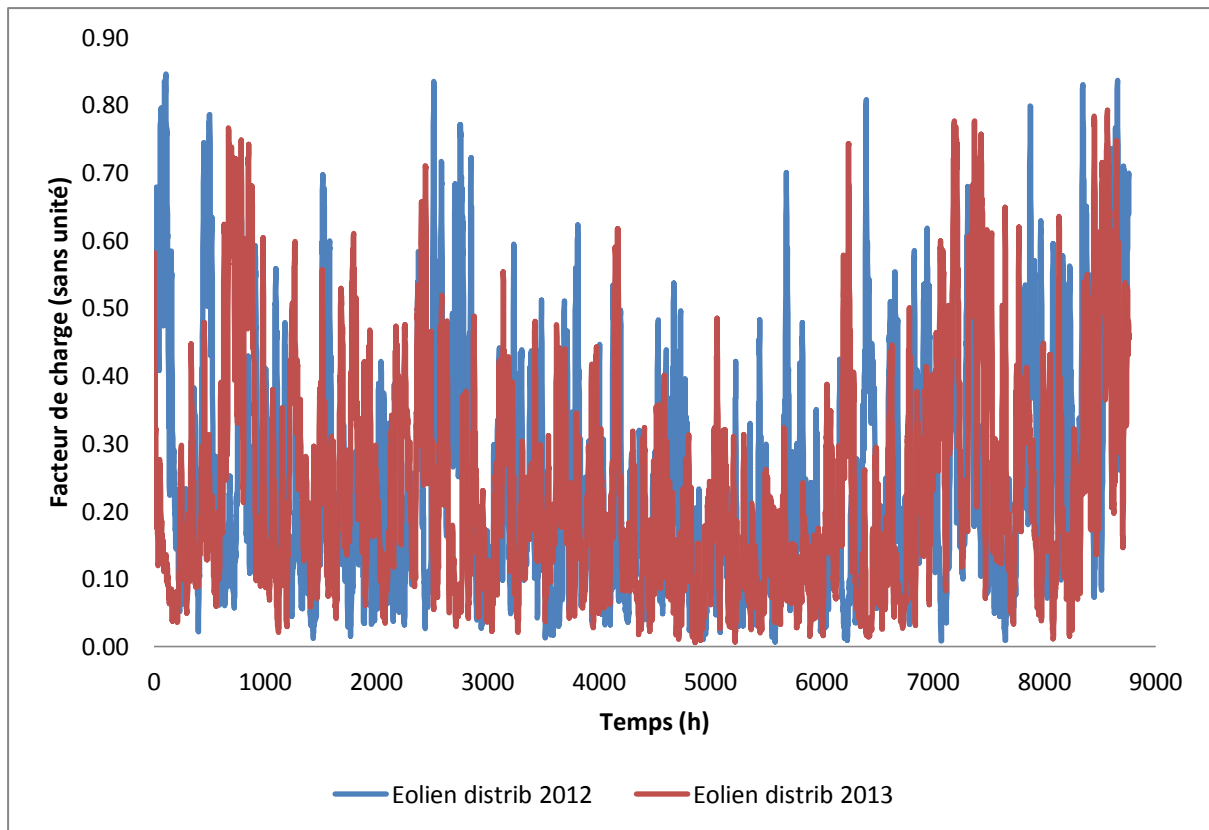


Figure 22 : Facteur de charge horaire éolien sur 2012/2013

Cependant, il ne suffit pas de moyenniser les valeurs des facteurs de charge historiques pour simuler un système de référence. En effet, dans ce cas, on sous-estime la valeur du maximum, on surestime la valeur du minimum et la cohérence avec les données climatiques de référence n'est pas assurée.

Il faut donc revenir aux données climatiques de référence que sont les vitesses de vent, lesquelles, de façon identique à la température, sont disponibles dans la réglementation thermique 2012 (RT 2012). Cela assure une homogénéité entre les données climatiques utilisées pour le calcul de la consommation nationale et le calcul des productions fatales dépendantes des facteurs climatiques.

Les capacités installées dans chacune des 21 régions métropolitaines françaises (Corse exclue), données par le site de la Fédération de l'Énergie Éolienne³³, sont groupées sur les huit zones thermiques utilisées dans la RT 2012. Lorsqu'une région appartient à deux zones thermiques différentes, la capacité éolienne est affectée au prorata du nombre de départements appartenant à chaque zone.

Tableau 14 : Part de la capacité éolienne installée dans chaque zone thermique, 2013

	H1a	H1b	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3
Z_{zone}	28,8	26,9	5,1	10,5	15,6	4,7	2,6	5,8

³³ <http://fee.asso.fr/centre-infos/cartographie/>

Le facteur de charge national final F_{w-fr} est la moyenne des facteurs de charge de chaque zone f_{zone} pondérée par la capacité installée.

$$F_{w-fr} = \sum_{zone} f_{zone} \times \frac{Z_{zone}}{100} \quad 2-6$$

On utilise ensuite une fonction de transfert illustrée dans la Figure 23 liant la vitesse de vent et la puissance installée pour approximer la production éolienne à l'heure h (de telles fonctions sont données par les constructeurs d'éoliennes). Il faut au préalable ajuster la valeur de la vitesse de vent, qui est donnée pour une hauteur de 10 m alors que le rotor des éoliennes est en moyenne situé à une altitude d'environ 100 m de haut³⁴. On considère la relation suivante :

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^\nu \quad 2-7$$

Où V_1 et V_2 sont respectivement les vitesses de vent à hauteur l_1 (10 m) et l_2 (100 m) et ν est un paramètre représentant la rugosité du terrain. Le paramètre ν peut varier de 0,08 pour un terrain faiblement accidenté (mer) à 0,4 pour un terrain très accidenté tel qu'un cœur de ville.

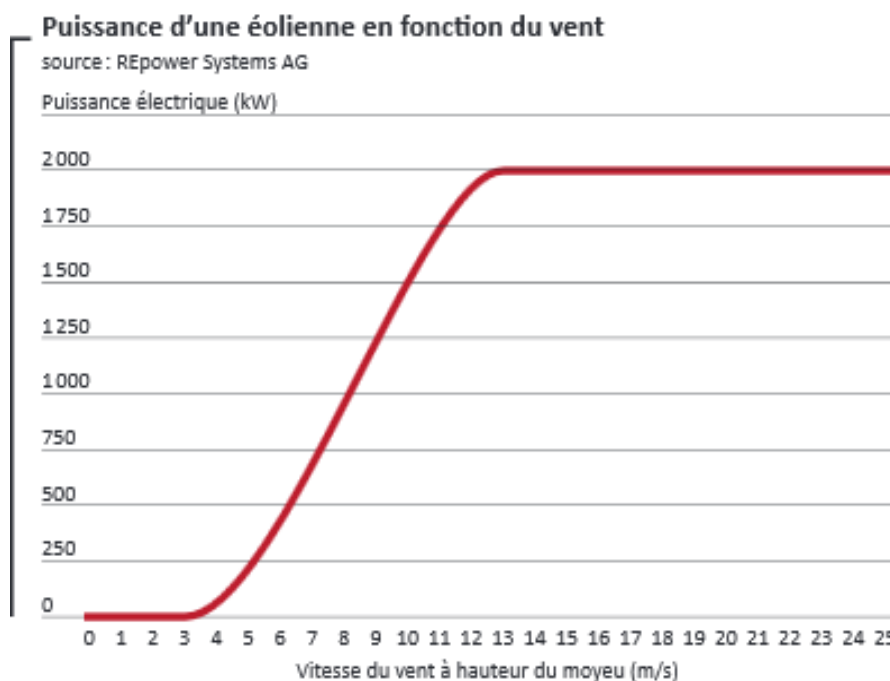


Figure 23 : Fonction de transfert d'une éolienne de 2MW (SER, 2012)

Cette fonction de transfert est représentée par :

- un seuil de mise en rotation de l'éolienne en S_{init} ;
- un fonctionnement à pleine puissance à partir de $S_{100\%}$ et au-delà ;
- un arrêt de sécurité au-dessus de S_{max} ;

³⁴ Hauteur moyenne considérée pour une éolienne de 2MW : <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-energie-eolienne.pdf>

- une relation linéaire entre S_{init} et $S_{100\%}$ où le facteur de charge de la zone thermique considérée est exprimé en fonction de la vitesse du vent V_2 de cette zone par :

$$F_{w-zone}(V_2) = \frac{V_2 - S_{init}}{(S_{100\%} - S_{init})} \quad 2-8$$

On assimile toutes des éoliennes françaises à un ensemble d'éoliennes identiques, dont les caractéristiques S_{init} , $S_{100\%}$ et S_{max} sont équivalentes. Les valeurs de S_{init} , $S_{100\%}$ et S_{max} sont identifiées sur l'année 2012 par la méthode de point intérieur en minimisant l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre le facteur de charge journalier calculé $\overline{F_{w-zone}}$ et le facteur de charge réel $\overline{F_{2012}}$. Le résultat de l'identification est présenté dans le Tableau 15. Ces valeurs sont proches de la fonction de transfert présentée en Figure 23.

Tableau 15 : Modélisation Eolien : Identification des paramètres de la fonction de transfert

	S_{init}	$S_{100\%}$	S_{max}
Valeur identifiée (m.s⁻¹)	2,9	12,5	25

La valeur du paramètre ν est ensuite identifiée pour s'approcher le plus possible du facteur de charge annuel correspondant à la moyenne des 5 dernières années, soit selon RTE : 22 %. Cela donne un paramètre ν de 0,17, ce qui correspond à un terrain de plaine relativement peu accidenté, cohérent avec une modélisation de la production éolienne.

Cette méthode permet d'évaluer un facteur de charge journalier, avec une MAPE de 4,6 % pour 2012 (et 4,1 % sur 2013) et un coefficient de corrélation de 0,93 pour 2012 et 0,92 sur 2013. Les facteurs de charge journaliers moyens calculés et mesurés sur 2013 sont présentés sur la figure 15 ci-dessous.

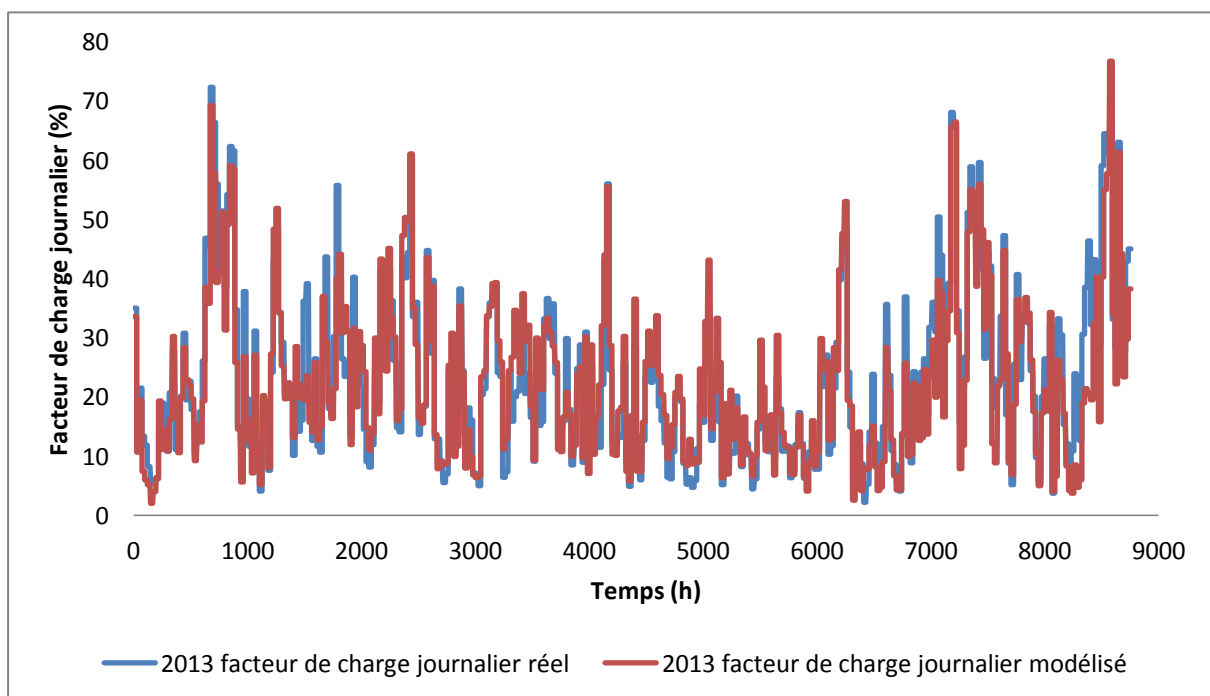


Figure 24 : Modélisation du facteur de charge éolien journalier moyen sur 2013

Cependant, la variation journalière du facteur de charge est mal représentée : le facteur de charge des heures de la journée est surestimé et celui des heures de nuit sous-estimé. Cela est dû au fait que le modèle ne tient pas compte de la turbulence du vent. Celle-ci est beaucoup plus forte en journée, sous l'action des rayons du soleil, que la nuit où les vents sont plus faibles mais beaucoup plus réguliers. S'il n'est pas nécessaire de tenir compte de la direction du vent étant donné que la plupart des éoliennes peuvent tourner sur leur mât, le fait de négliger la turbulence introduit une erreur systématique dans le modèle.

Afin de traiter cette erreur systématique, le modèle a été complété par un modèle statistique utilisant les résultats du modèle physique et les historiques de production. La procédure complète est schématisée sur la Figure 25 et décrite dans le paragraphe suivant.

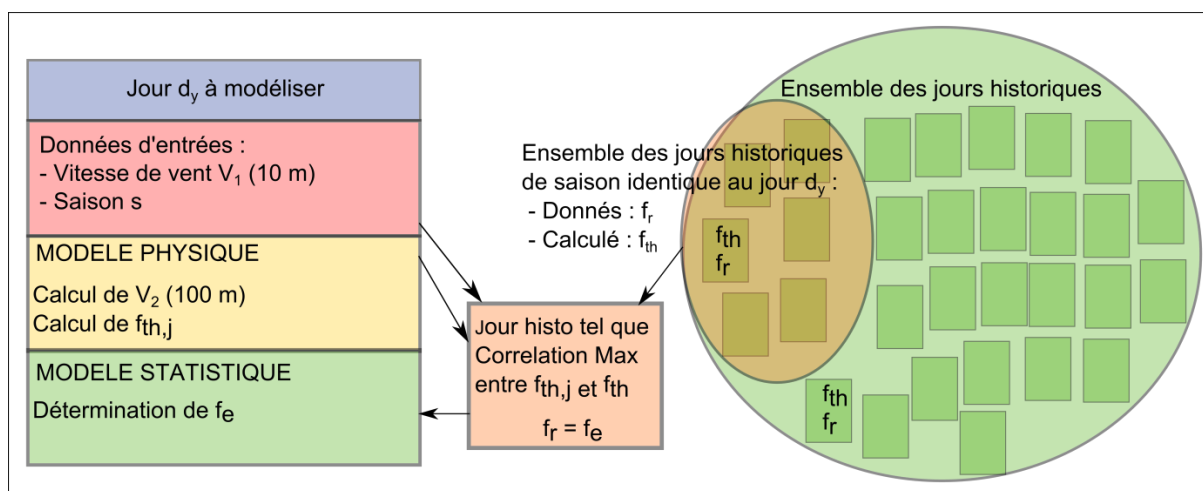


Figure 25 : Procédure de détermination du facteur de charge éolien "type"

On définit :

- $d_y \in [1..365]$ un jour à modéliser à partir des données météorologiques types, appartenant à la saison s .
- L'ensemble des jours d_{histo} de 2012 et 2013 pour lesquels on connaît les facteurs de charge réels f_r pour chaque jour (24 valeurs, une pour chaque heure du jour). A chaque d_{histo} correspond un f_r et une saison (été, hiver ou intersaison³⁵). On peut calculer un vecteur de facteurs de charge horaires théorique $f_{\text{histo-th}}$ pour chacun de ces jours, sur la base du modèle physique proposé plus haut.
- f_{th} le vecteur des facteurs de charge horaire théorique du jour à modéliser.
- f_e le vecteur des facteurs de charge estimé pour le jour à modéliser en fonction des données mesurées.

La procédure est la suivante :

1. On calcule pour le jour à modéliser le vecteur des facteurs de charge théorique f_{th} selon le modèle physique basé sur la fonction de transfert : vitesse de vent/facteur de charge. On calcule également sa moyenne journalière $\overline{f_{th}}$.

³⁵ Définies par les solstices et les équinoxes, l'intersaison regroupe le printemps et l'automne.

2. On sélectionne parmi les d_{histo} les 10 jours dont la saison est identique au jour à modéliser et dont le facteur de charge moyen journalier est le plus proche de $\overline{f_{th}}$.
3. Pour ces 10 jours « voisins », on calcule la corrélation entre les vecteurs de charge horaires théoriques calculés par le modèle physique (f_{th} et f_{r-th}).
4. On sélectionne le jour historique dont le coefficient de corrélation entre f_{th} et f_{r-th} est le plus proche de 1.
5. Le vecteur des facteurs de charge horaire estimé pour le jour j à modéliser est égal au vecteur des facteurs de charge horaire f_r du jour historique sélectionné.

La méthode complète (modèle physique + statistique) a été validée sur janvier à Octobre 2014 et donne un facteur de corrélation de 0,87 et une MAE de 668 MW, ce qui représente 8 % de la puissance installée et 23 % de la production moyenne. Sur 60 jours, le biais sur la production totale modélisée est de 5,2 % par rapport à la production mesurée. L'ajout de ce modèle statistique permet de traiter efficacement le problème d'erreur systématique, comme illustré sur la Figure 26 présentant la modélisation sur les premiers jours de 2014. On conserve également une base physique faisant le lien avec les données météorologiques types.

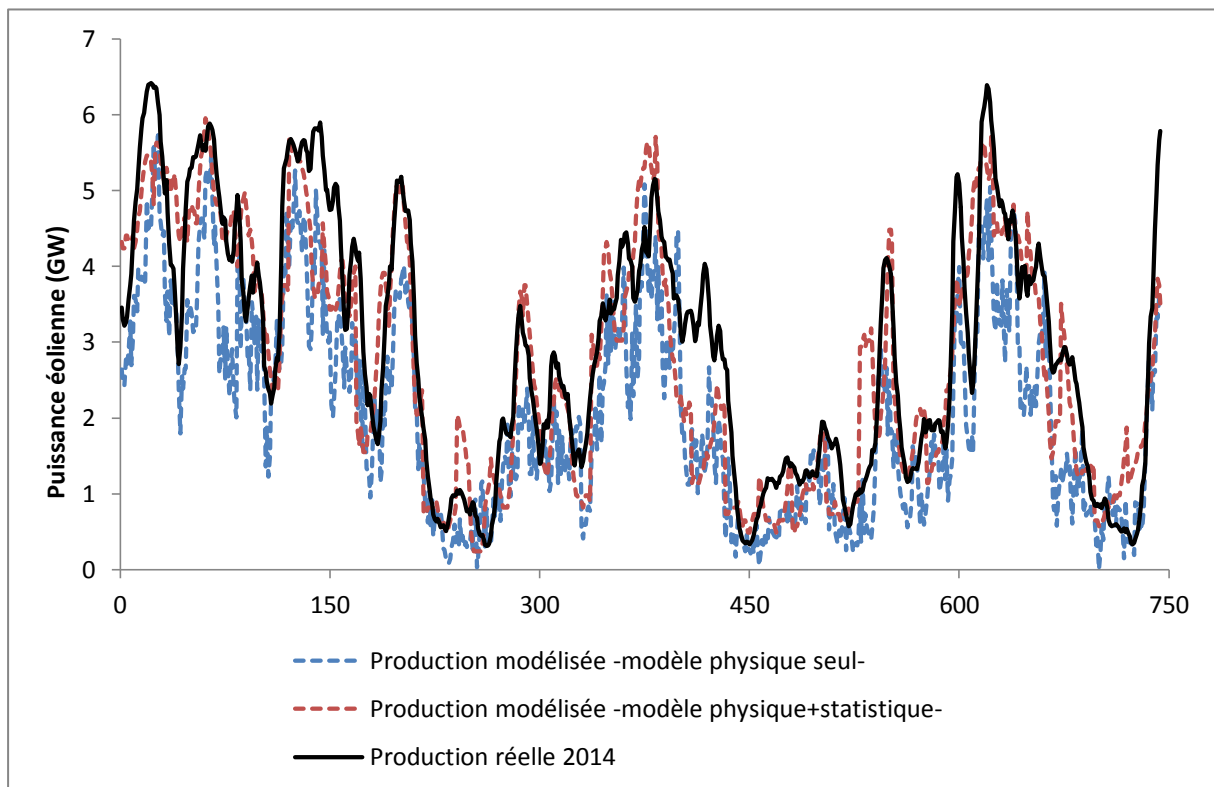


Figure 26 : Production éolienne, janvier 2014

Le régime des vents variant en fonction des saisons, seuls les jours de J_{histo} appartenant à une saison identique à j peuvent être candidats pour le jour le plus proche, ce qui laisse 182 candidats. Un nombre plus important de données permettrait de prendre en compte les conditions de température, ce qui n'a pas pu être effectué ici. Cela permettra de renforcer la précision du modèle.

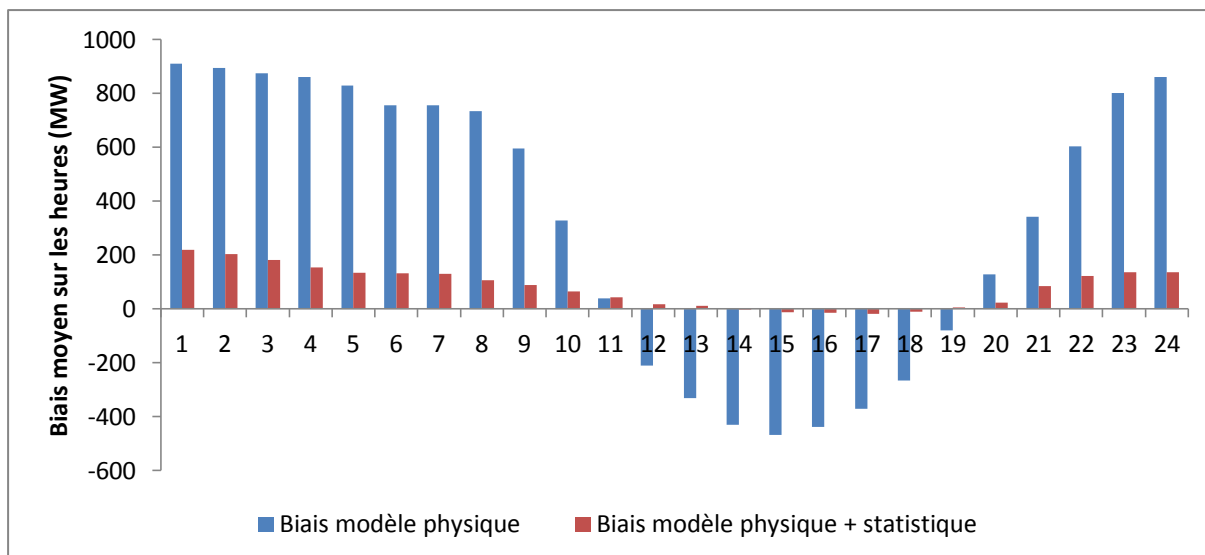


Figure 27 : Production éolienne, biais moyen sur les heures

Le facteur de charge horaire type résultant de cette modélisation est donné ci-dessous.

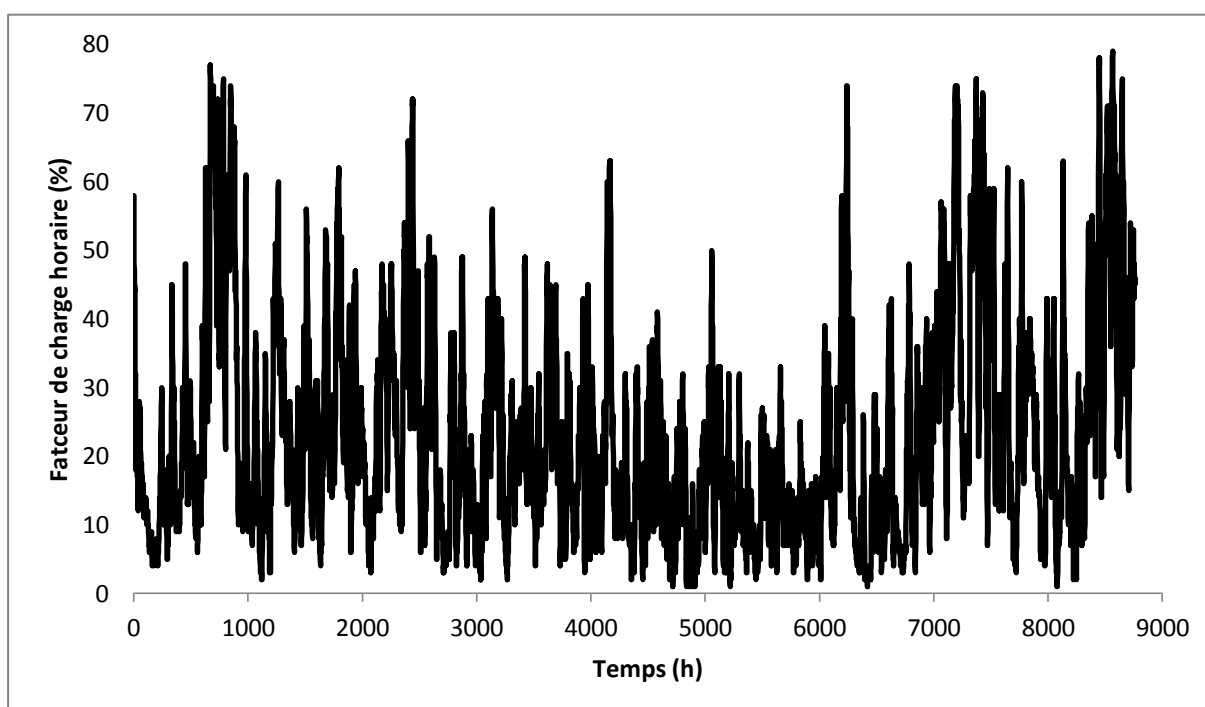


Figure 28 : Facteur de charge horaire « type » modélisé

Cette modélisation est retenue pour modéliser le facteur de charge horaire moyen du parc éolien français.

2.4.2.3. PHOTOVOLTAÏQUE (PV)

Les données de production PV horaires sont fournies par RTE depuis 2012. Il s'agit d'une production dépendante des conditions climatiques, une moyenne des valeurs historiques n'est donc pas satisfaisante pour assurer la cohérence de l'ensemble du modèle.

On considère que le facteur de charge horaire de la production solaire (ratio de la production à l'heure h divisée par la capacité installée, en %) est proportionnel au rayonnement global à 30° G_{30} au Sud dans chaque région de latitude moyenne φ . Soit un facteur de charge horaire $PV_{\%}(h_y)$ pour chaque heure de l'année (de 1 à 8760) exprimé sous la forme :

$$PV_{\%}(h_y) = R_{PV} \times G_{30}(h_y) \quad 2-9$$

Le rayonnement global incliné (30°) est la somme des rayonnements directs (G_{D30}), diffus (G_{d30}) et réfléchis (G_{r30}) inclinés. Les fichiers météorologiques de la RT2012 donnent des valeurs horaires de rayonnement direct normal (G_{DN}) et diffus horizontal (G_{dh}) en $W.m^{-2}$, le rayonnement réfléchi sera approximé avec une valeur d'albédo (ρ) de 0,2. Les différents angles utilisés sont représentés sur la Figure 29.

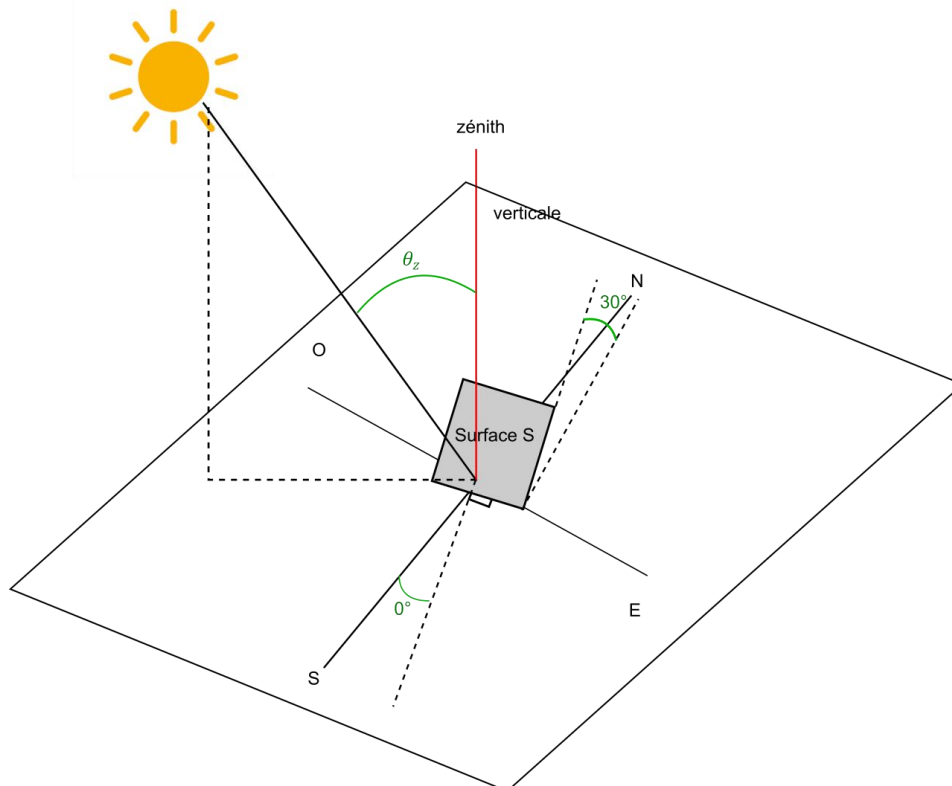


Figure 29 : Rayonnement sur une surface inclinée à 30°

Le rayonnement global à 30° au sud (0°) à chaque heure peut s'exprimer sous la forme :

$$G_{30}(h_y) = G_{D30}(h_y) + G_{d30}(h_y) + G_{r30}(h_y) \quad 2-10$$

Puis chaque rayonnement en fonction des données connues G_{DN} , G_{dh} et φ :

$$G_{D30}(h_y) = G_{DN}(h_y) \times \cos \theta \quad 2-11$$

$$G_{d30}(h_y) = G_{dh}(h_y) \times \frac{1 + \cos 30^\circ}{2} \quad 2-12$$

$$G_{r30}(h_y) = \rho \times G_h(h_y) \times \frac{1 - \cos 30^\circ}{2} \quad 2-13$$

$$\text{soit } G_{r30}(h_y) = \rho \times (G_{Dh}(h_y) + G_{dh}(h_y)) \times \frac{1 - \cos 30^\circ}{2} \quad 2-14$$

$$\text{avec } G_{Dh}(h_y) = G_{DN}(h_y) \times \cos \theta_z \quad 2-15$$

Avec

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \times \sin \varphi \times \cos 30^\circ - \sin \delta \times \cos \varphi \times \sin 30^\circ \times \cos 0^\circ + \cos \delta \times \cos \varphi \times \cos 30^\circ \\ & \times \cos \omega + \cos \delta \times \sin \varphi \times \sin 30^\circ \times \cos 0^\circ \times \cos \omega \\ & + \cos \delta \times \sin 30^\circ \times \sin 0^\circ \times \sin \omega \end{aligned} \quad 2-16$$

$$\cos \theta_z = \cos \delta \times \cos \varphi \times \cos \omega + \sin \delta \times \sin \varphi \quad 2-17$$

Où l'angle horaire ω et la déclinaison δ du soleil sont donnés en fonction de l'heure de la journée (h_d) et du jour de l'année d_y par :

$$\omega = 15 \times (h_d - 12) \quad 2-18$$

$$\delta = 23.45 \times \sin \left(360 \times \frac{284 + d_y}{365} \right) \quad 2-19$$

Le coefficient R_{PV} de proportionnalité avec le rayonnement global est identifié pour s'approcher le plus possible du facteur de charge moyen observé sur les 5 dernières années, donné par RTE, soit 14,3%. En fonction de la capacité installée dans chaque région, un facteur de pondération est calculé pour chaque zone thermique, de la même façon que pour l'éolien.

Les capacités installées dans chaque région sont issues des données 2013 Hespul/ADEME³⁶. Le tableau des coefficients par zone climatique est donné ci-dessous, ainsi que la valeur des latitudes moyennes considérées :

Tableau 16 : Part des capacités PV installées par zone RT et latitude des zones RT

Zone RT	H1a	H1b	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3
K (%)	6,8	11,5	15,8	3,9	13,9	23,1	9,0	16,0
Latitude (°)³⁷	48,8	48,4	46,3	48,1	46,2	44,2	44,1	43,7

³⁶http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/panorama_des_energies_renouvelables_2013.pdf, Hespul/ADEME

³⁷ Latitude de la ville représentant la zone thermique

Ce facteur de charge calculé à partir des données de rayonnement de la RT2012 et multiplié par la capacité installée au niveau national permet d'estimer la production photovoltaïque correspondant à une année type.

2.4.2.4. THERMIQUE DÉCENTRALISÉ

Concernant la production thermique décentralisée, elle est intégrée dans 2 sources de données différentes dans les catégories de RTE, selon que l'énergie utilisée est considérée comme renouvelable (Biomasse, biogaz et déchets - même si l'appellation renouvelable est abusive dans ce dernier cas) ou fossile (gaz, fioul).

Déchets, Biomasse et biogaz

La production thermique d'origine non fossile (biomasse, biogaz et déchet), est disponible de façon agrégée pour 2012 et détaillée pour 2013³⁸. Les capacités installées pour ces technologies n'ont quasiment pas varié entre 2012 et 2013 (RTE 2013). Le facteur de charge de référence est donc simplement la moyenne des facteurs de charge 2012-2013. Le détail pour la production en 2013 selon les trois technologies est présenté Figure 20. Le résultat des facteurs de charge horaire intégrés dans le modèle est présenté Figure 31.

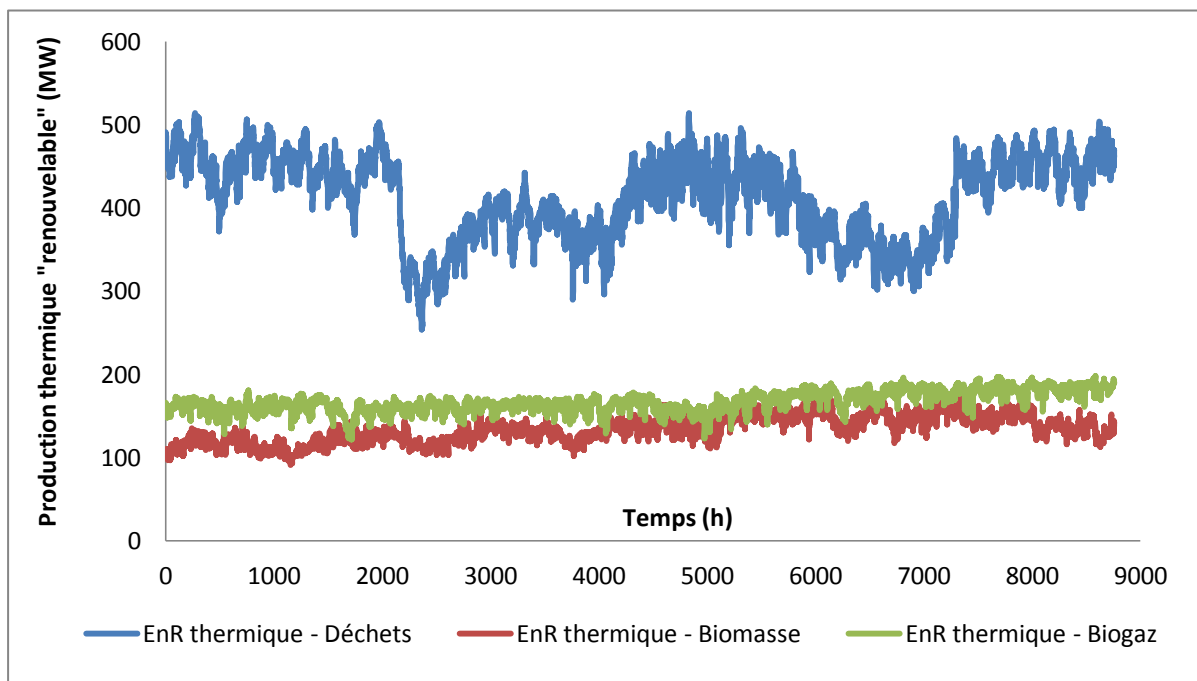


Figure 30 : Production totale décentralisée Déchets, Biomasse et Biogaz, en 2013

³⁸ <http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix>

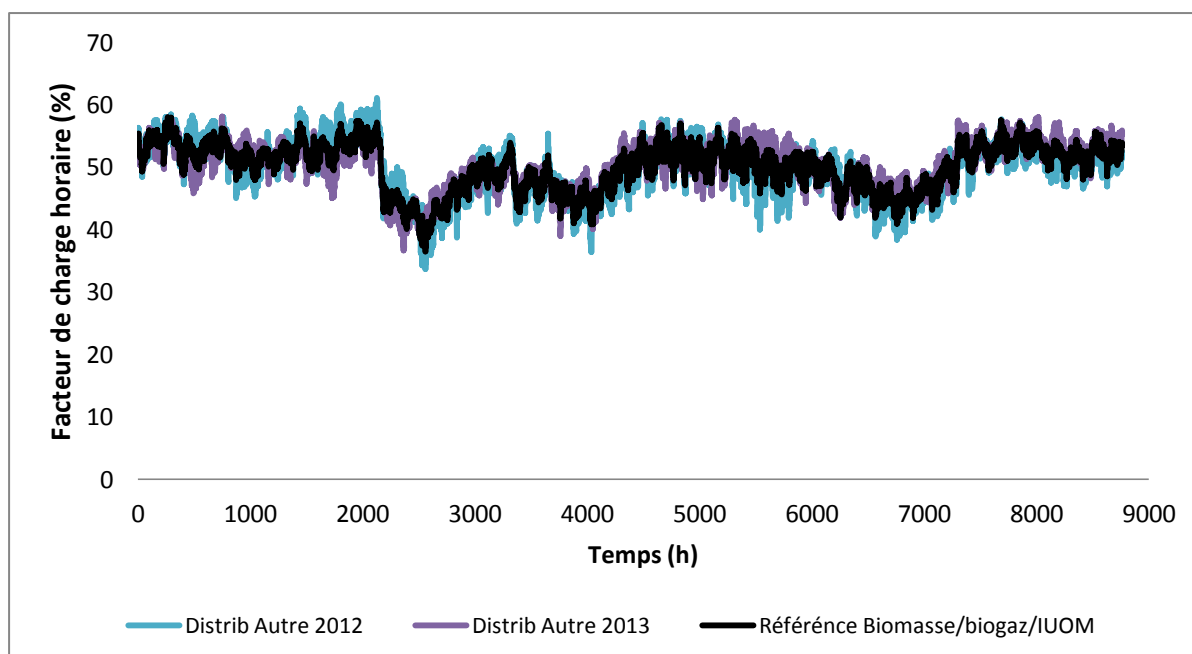


Figure 31 : Facteur de charge horaire 2012-2013 et facteur de charge « type » pour la production décentralisée « renouvelable » (Déchets, Biomasse et Biogaz)

Gaz et Fioul

Afin de reconstituer un facteur de charge « type » pour la production décentralisée gaz et fioul, on cherche à exploiter l'ensemble des données existantes des années de calibrage 2012 et 2013. Pour 2012, les données concernant la production décentralisée de cogénération au fioul et au gaz sont agrégées avec la production centralisée du même type. Pour 2013, les données sont plus détaillées et on dispose de 4 catégories de production différenciées représentant la seule production fatale: Fioul cogénération, Gaz cogénération, Fioul Autre, Gaz Autre.

Une première étape consiste à extraire des données de 2012 la seule production fatale. On constate en étudiant les données réelles de production pour cette année³⁹, représentées sur Figure 32, deux comportements distincts qui correspondent aux deux utilisations des technologies : d'une part un bruit de fond : une production constante, plus élevée en hiver qui correspond au fonctionnement des réseaux de chaleur urbains avec cogénération et, d'autre part, une production très variable utilisée pour suivre la courbe de la demande en électricité.

³⁹ Disponibles sur <http://www.rte-france.com/fr/developpement-durable/eco2mix>

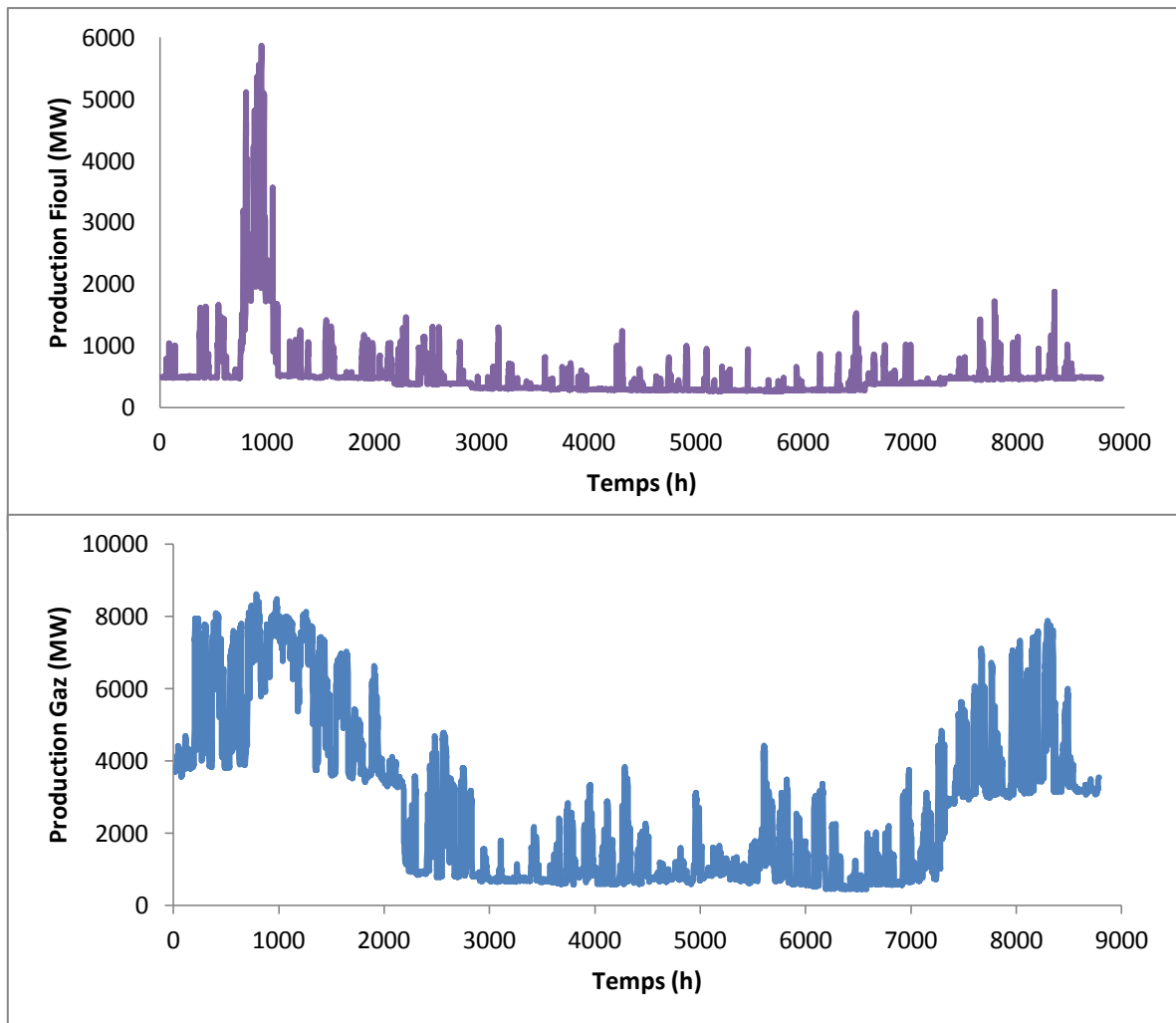


Figure 32 : Production totale (centralisée et décentralisée) au fioul (haut) et gaz (bas) en 2012

Les données de production fatale 2012 (thermique décentralisée) sont alors séparées des données de production modulable. L'utilisation du minimum annuel de production n'est pas envisageable : il se situe peut-être au moment d'un aléa de production. Plus la plage sur laquelle est effectuée le minimum est restreinte plus les aléas seront intégrés dans la modélisation mais plus il y a de risque d'inclure une partie de la production décentralisée. Il faut donc chercher le bon compromis, qui est différent pour le gaz et le fioul. La production résultant de cogénération gaz varie avec la température. Il ne faut donc pas considérer une plage trop importante (supérieure à 4 jours) pour calculer le minimum de production venant des groupes décentralisés. Toutefois, une durée trop courte sur le gaz néglige son possible fonctionnement en semi-base à l'échelle de la semaine (jour ouvré). Le compromis de trois jours et demi intègre ces deux paramètres : supérieur à 3 jours pour éviter les effets de week-end (la consommation moyenne du lundi est également plus basse que la moyenne de la semaine, cf. paragraphe 3.1.2) et inférieur à 4 pour ne pas biaiser les effets de température. Pour le fioul, l'utilisation d'un minimum journalier est suffisante pour extraire la partie fatale sans intégrer de production centralisée.

On a alors les expressions suivantes pour l'heure h :

$$P_{CHP-gas}(h) = \min_{h-\Delta t_1 \leq x \leq h+\Delta t_1} P_{totale-gas}(x) \quad 2-20$$

$$P_{CHP-fuel}(h) = \min_{h-\Delta t_2 \leq x \leq h+\Delta t_2} P_{totale-fuel}(x) \quad 2-21$$

Avec $\Delta t_1 = 3,5 \times \frac{24}{2}$ et $\Delta t_2 = \frac{24}{2}$

Les données calculées ont été comparées aux données de 2013, directement exploitables. On peut constater sur la Figure 33 une bonne correspondance entre les données estimées de 2012 et les données de 2013.

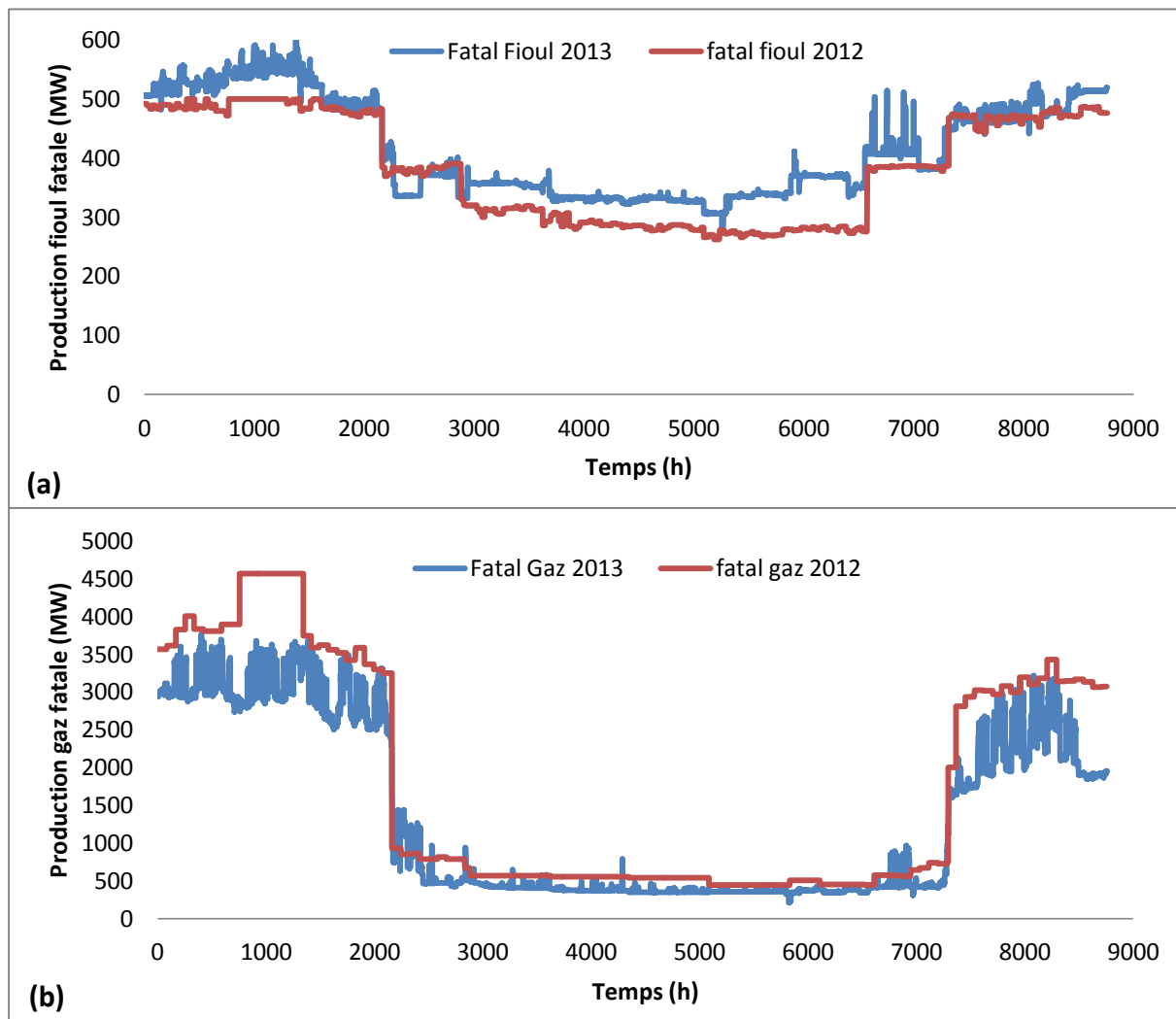


Figure 33 : Données Eco2Mix de production Fioul (a) et Gaz (b) en 2012 et 2013

La capacité installée et en conséquence la production d'électricité des centrales à cogénération fossile a beaucoup décliné entre début 2012 et fin 2013, comme on le voit sur la figure ci-dessous, extraite du Bilan prévisionnel RTE 2013.

Le décrochage important de la production que l'on observe en mars (on passe de près de 80 % à 20 % de la capacité installée utilisée) montre l'effet des contrats d'achat liés à la production par cogénération, qui valorisent l'électricité produite en hiver. Cet effet est beaucoup plus marqué pour le gaz que pour le fioul.

Hypothèse de production hivernale par la cogénération

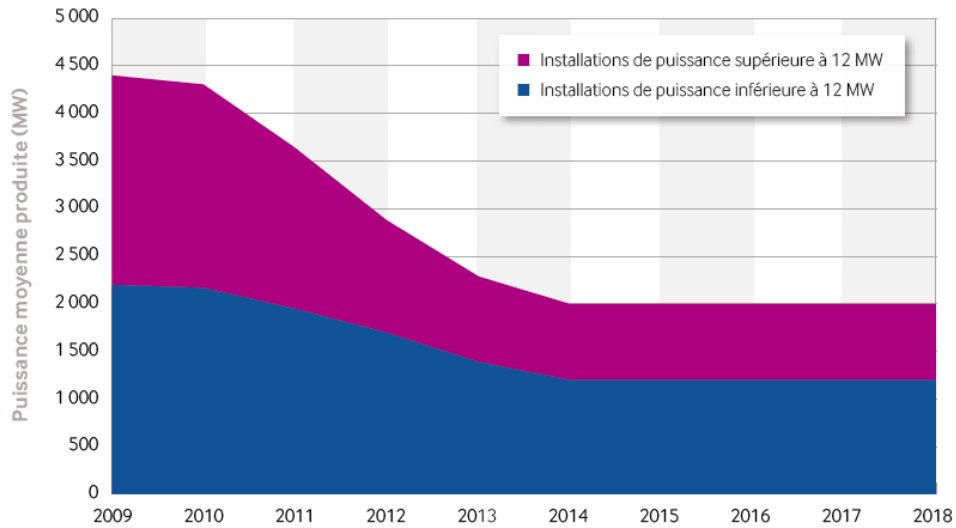


Figure 34 : Puissance moyenne produite par la cogénération entre 2009 et 2018 en hiver, source (RTE 2013)

Le facteur de charge calculé pour les années réelles (2012 et 2013) doit tenir compte de cette variation. Pour tenir compte de la baisse de capacité installée, on considère une baisse linéaire de 5000 à 3000 MW entre janvier 2012 et décembre 2013. Le facteur de charge horaire pour la cogénération gaz est obtenu en divisant la production réelle par la capacité installée correspondante. On considère un facteur de charge constant de 0,8 pour la production fioul, peu marquée par les variations saisonnières des contrats d'achats. On peut noter que des unités de production supplémentaires sont incluses dans ce groupe de technologies alors qu'elles ne sont pas des unités de cogénération, mais des productions appelées « fioul autre » ou « gaz autre » par RTE et dont les caractéristiques précises sont méconnues.

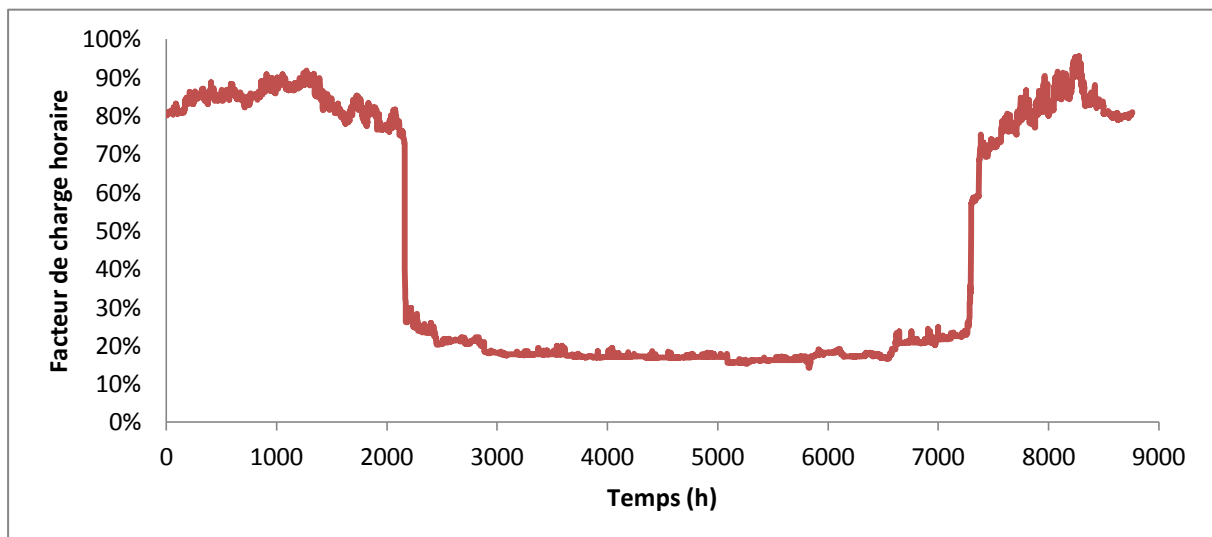


Figure 35 : Facteur de charge horaire « type » cogénération gaz

2.4.2.5. HYDRAULIQUE FATALE

Concernant l'hydraulique, les données de RTE disponibles ne donnent pas séparément la production fatale (fil de l'eau) et la production modulable (hydraulique de lac et éclusée). Cependant, on connaît la puissance installée : 7,6 GW au fil de l'eau selon RTE, 8,5 GW selon le SER.

La répartition de production moyenne entre les différentes centrales est donnée par le SER, et présentée sur la Figure 36.

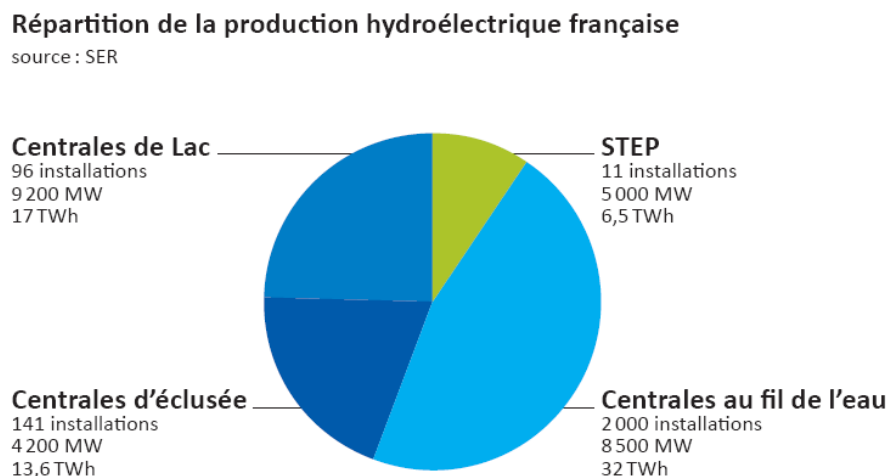


Figure 36 : Production hydroélectrique moyenne en France (source: SER)⁴⁰

Les services du ministère de l'environnement indiquent un productible un peu plus élevé de 37 TWh en centrale au fil de l'eau^{41,42}. Le SER précise également que, concernant l'hydraulique au fil de l'eau, 55 % de la puissance installée est disponible en permanence tout au long de l'année. Cependant l'analyse de la production hydraulique de 2012 montre que la puissance minimale d'origine hydraulique injectée est de 2475 MW, bien en deçà d'une production escomptée de 4250 MW. A cause d'une variation importante des régimes de précipitations au cours de l'année, il n'est pas satisfaisant de modéliser l'hydraulique au fil de l'eau en considérant une donnée constante.

L'état des stocks hydrauliques ne peut pas non plus être utilisé pour déduire la production hydraulique au fil de l'eau. En effet, les centrales au fil de l'eau fonctionnent sans réservoir, donc sans stock. Au contraire des centrales hydrauliques de lac, qui peuvent stocker l'eau sur au moins 200 heures et donc moduler de façon saisonnière la ressource en eau, les centrales au fil de l'eau suivent la disponibilité instantanée du débit des rivières. La variation de la production minimale mensuelle sur 2012 est illustrée sur la Figure 37 et reflète le

⁴⁰ http://www.enr.fr/docs/2009204901_Hydraumars2009toutesenbassedf.pdf

⁴¹ <http://www.developpement-durable.fr/IMG/pdf/Hydroelectricite.pdf>

⁴² L'énergie productible est celle qui serait tirée des apports naturels si les usines étaient exploitées en permanence dans les conditions optimales. Elle est estimée à partir des débits d'apports en moyenne sur longue période.

régime des précipitations de 2012 : un printemps très pluvieux (mai, juin, en bleu), un début d'année sec (février, mars, en jaune) et une vague de chaleur en août (en rouge)⁴³.

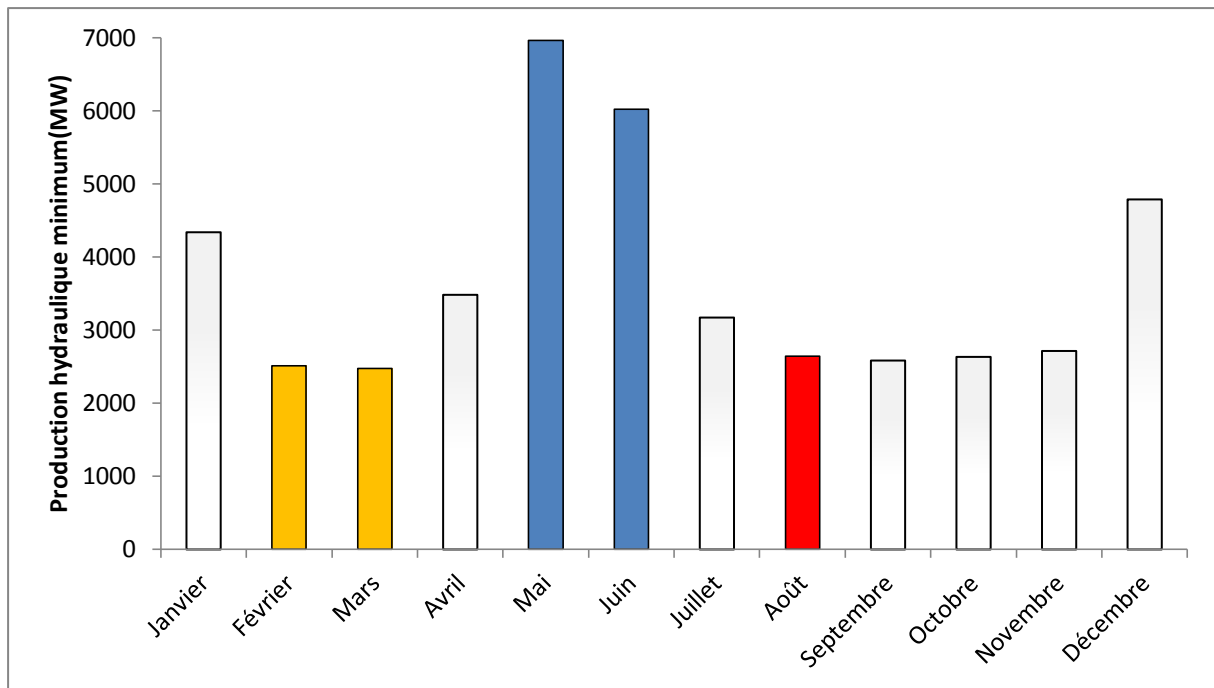


Figure 37 : Production hydraulique mensuelle minimale sur 2012

L'hydraulique fatale varie en fonction des précipitations, de la fonte des neiges, d'autres variables locales influençant le débit des fleuves et rivières : autant de paramètres sur lesquels nous n'avons pas ou peu d'informations. Il s'agit donc, à partir de ce qui est disponible, de reconstituer un comportement d'ensemble. Les apports en eau sont contenus implicitement dans les données de production totale d'hydroélectricité, mais les valeurs sont agrégées avec la production de lac qui fonctionne de façon très différente, grâce à son important volume de stockage.

Afin de reconstituer ce comportement d'ensemble, il faut premièrement séparer l'hydraulique éclusée en production fatale et production modulable. On cherche ensuite pour la production fatale à déterminer un facteur de charge variable au cours de l'année afin de tenir compte de la variation des apports naturels en eau. Deux approches distinctes sont possibles :

- Approcher le productible hydraulique fatal par une moyenne du minimum de production journalière de l'hydraulique totale sur les années 2007 à 2013.
- Utiliser la moyenne historique de disponibilité des centrales fil de l'eau et éclusée (les valeurs ne sont pas disponibles de façon séparée). Ces données sont disponibles pour les années 2010 à 2013.

⁴³ <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/bilan-2012/bilan-de-lannee-2012#>

Séparation de la production hydraulique éclusée en fatale et modulable.

La production hydraulique fatale est constituée par la production au fil de l'eau et par une partie de la production éclusée. Le pourcentage de participation de l'hydraulique éclusée est déterminé de la façon suivante : en reprenant les données du SER précédemment utilisées⁴⁴, on calcule pour chaque moyen de production hydraulique la production annuelle moyenne par GW installé. On obtient le tableau suivant.

Tableau 17 : Productions et capacités des différents types de centrale hydroélectrique en France

Technologie	Hydraulique au fil de l'eau	Hydraulique éclusé	Hydraulique de lac
Production moyenne (TWh)	32	13,6	17
Capacité installée (GW)	8,5	4,2	9,2
Ratio (TWh/GW)	3,8	3,2	1,8

On considère ensuite que le comportement de l'hydraulique éclusée peut être assimilé à une moyenne entre l'hydraulique de lac et l'hydraulique au fil de l'eau. On cherche donc x la part de l'hydraulique de lac et y la part de l'hydraulique au fil de l'eau tel que

$$3,2 = 1,8 \times x + 3,4 \times y \quad 2-22$$

et

$$x + y = 1 \quad 2-23$$

soit

$$x = 0,3 \text{ et } y = 0,7 \quad 2-24$$

On considère donc 70 % de la capacité hydraulique éclusée et 70 % de sa production comme étant intégré à la production fatale.

Facteur de charge fatal basé sur les minimums journaliers de production hydraulique.

Sur 2013 on dispose de la production hydraulique au fil de l'eau groupée avec l'hydraulique éclusée. On constate une variation de la production en fonction de la demande mais celle-ci est faible. La production hydraulique fatale est une entrée du modèle de mix électrique car elle n'est pas ou très peu modulable en fonction de la demande. Cela justifie l'utilisation des données de production hydraulique pour la modéliser.

Grâce aux données de l'année 2013, pour laquelle la production de lac est séparée de la production au fil de l'eau et éclusée, on cherche un modèle permettant de reconstituer une partie (fil de l'eau + éclusé) à partir du tout (production hydraulique totale). La production hydraulique totale et la consommation étant accessibles pour les années 2007 à 2013, l'objectif est ensuite de créer un profil de production hydraulique fatale moyen basé sur les données historiques.

⁴⁴ http://www.enr.fr/docs/2009204901_Hydraumars2009toutesenbassedf.pdf

L'exemple ci-après présente la production hydraulique d'une journée du premier trimestre 2013. On constate que la production hydraulique totale est proche de la production au fil de l'eau + éclusée au moment des minimums journaliers et hebdomadaires. Cependant, l'hydraulique de lac n'est jamais nulle. On remarque également une faible modulation de la production au fil de l'eau + éclusée durant la journée. La moyenne des minimums journaliers de production hydraulique totale des années 2007 à 2013 peut être retenue comme approximation pour le productible hydraulique fatal de référence.

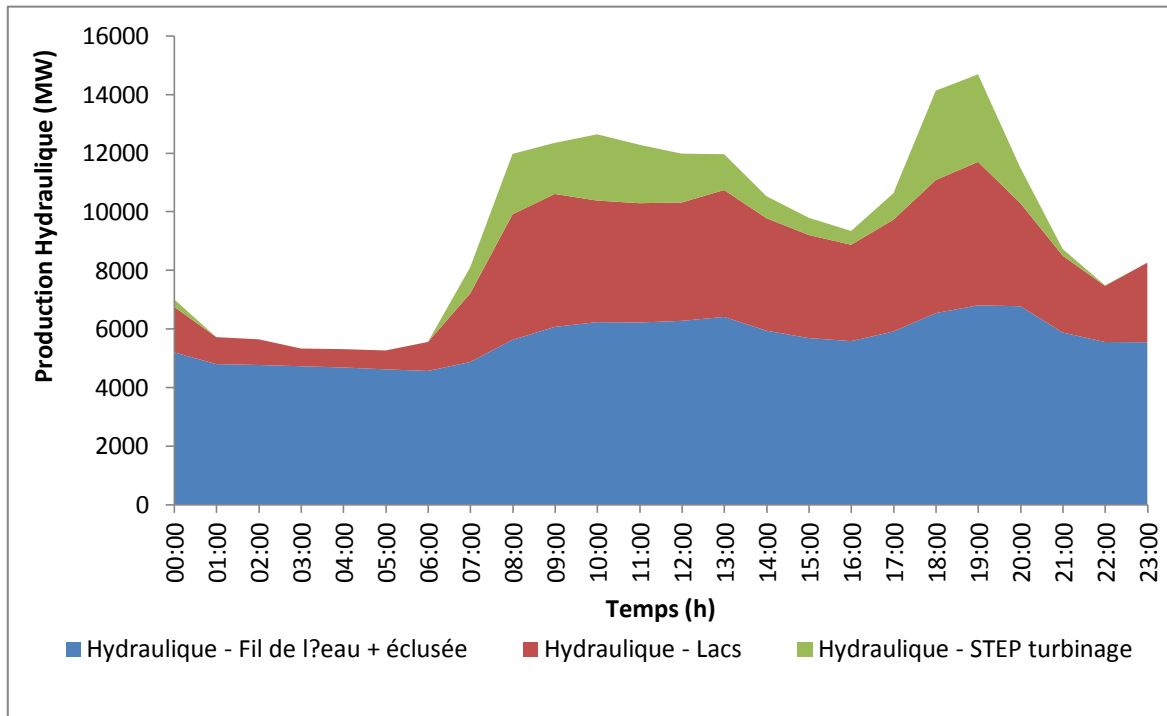


Figure 38 : Production hydraulique sur une journée, extrait du premier trimestre 2013

La production fatale est ensuite approximée par la moyenne entre 2007 et 2013 des minimums journaliers de production hydraulique (Fil de l'eau + Eclusée + Lac) selon l'équation suivante, définie pour un jour j_3 (de 1 à 365):

$$P_{Hydro-fatale}(j_3) = \frac{\sum_{y=2007}^{2013} \text{Min}_{h_1 \in j_3} (P_{Hydro-totale}(y, h_1))}{7} \quad 2-25$$

Cette production est donc considérée comme constante sur la journée.

La variabilité de la production hydraulique d'une année sur l'autre est très importante, plusieurs années sont nécessaires pour pouvoir faire une approximation fiable du productible moyen. Ce calcul permet d'intégrer toutes les années disponibles, même si les données ne sont pas disponibles pour chaque technologie séparément.

Cette production est ensuite lissée sur deux semaines pour atténuer les effets de palier. La production totale est alors de 38,1 TWh sur l'année. Cette production est ajustée sur le productible annuel de 41,5 TWh ($32+13,6 \times 0,7$) et divisée par la capacité installée ($8,5+2,9$), (Chiffre SER) pour obtenir un facteur de charge horaire.

On a donc pour toutes les heures du jour j_3 (de 1 à 365) un facteur de charge type exprimé comme suit:

$$F_{fil} = P_{Hydro-fatale} \times \frac{E_{hydroFatal}}{\sum_{j_3=1}^{365} P_{Hydro-fatale}} \times \frac{1}{(K_{hydroFatal})} \quad 2-26$$

Ceci permet de tenir compte des variations saisonnières du productible sans introduire d' « effet de marche ».

Facteur de charge fatal basé sur la disponibilité historique des centrales fil de l'eau et éclusées.

La disponibilité journalière du groupe de centrales fil de l'eau et éclusées est disponible pour les années 2010 à 2013 (voir Figure 39). La moyenne de ces données lissée sur deux semaines, puis recentrée et ramenée au facteur de charge historique moyen (0,46), permet de définir un facteur de charge pour l'hydraulique fatale.

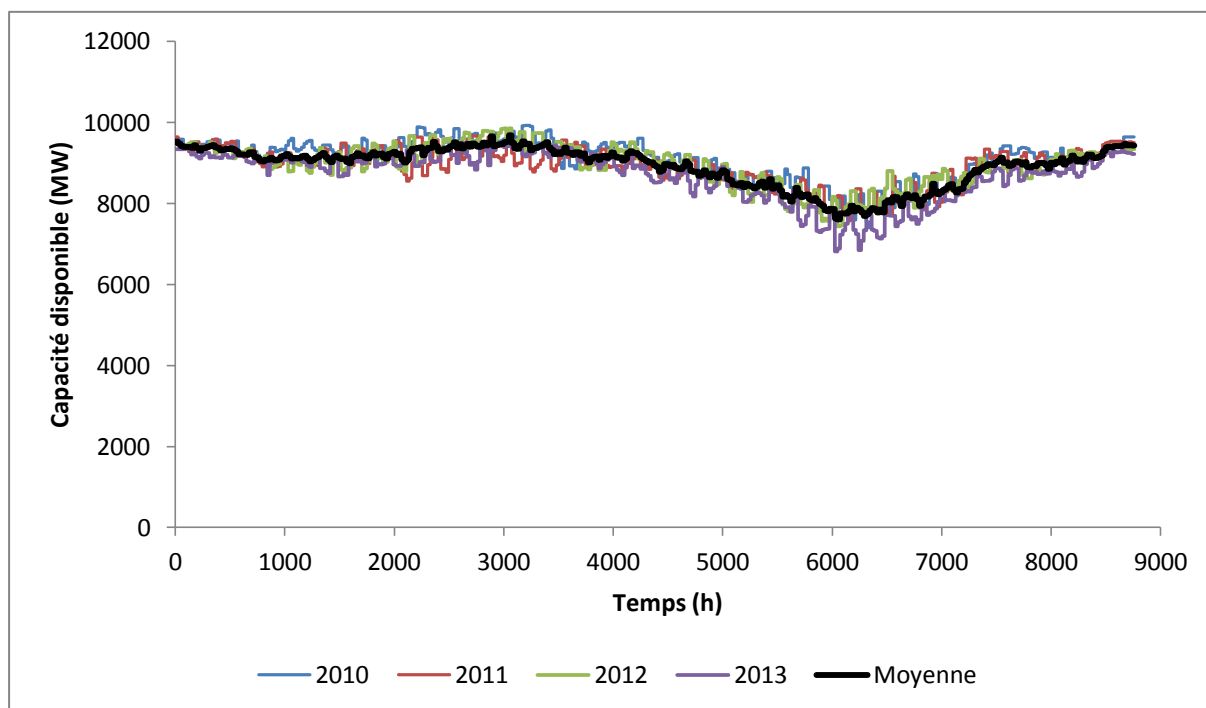


Figure 39 : Capacité disponible des centrales fil de l'eau et éclusées pour 2010 à 2013 et moyenne

On constate que la disponibilité des centrales concorde avec les tendances générales de production hydraulique : une disponibilité plus faible en fin d'été lorsque le débit des fleuves est le plus bas et à l'inverse une production un peu plus élevée au printemps lorsque la fonte des neiges alimente les cours d'eau et que les pluies sont fréquentes.

Facteur de charge fatal basé sur la disponibilité historique des centrales fil de l'eau et éclusées.

Les deux possibilités pour le facteur de charge hydraulique fatale de référence sont présentées sur la Figure 40.

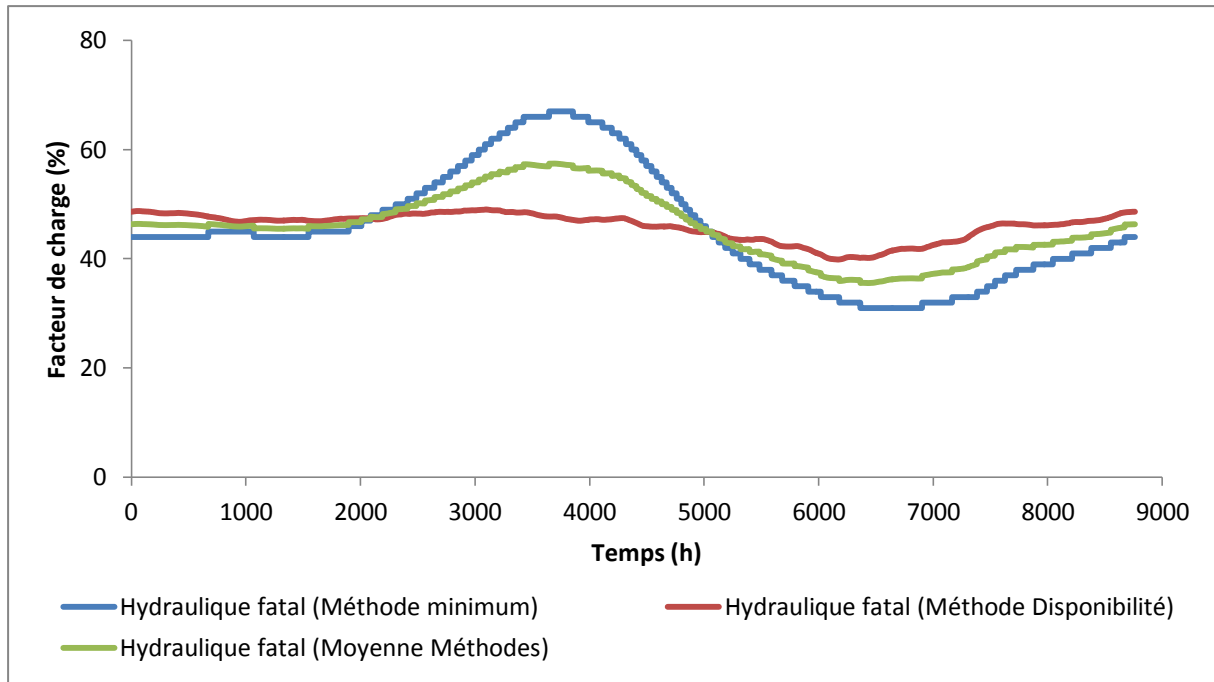


Figure 40 : Facteur de charge hydraulique fil de l'eau modélisée

Le facteur de charge basé sur les minimums journaliers introduit un contraste très important entre les saisons. *A contrario*, le facteur de charge basé sur les disponibilités tient très peu compte des apports naturels : l'hiver et le printemps sont quasiment identiques. Le facteur de charge basé sur les minimums journaliers est conservé en première approximation pour le modèle de référence.

2.4.3. Productions modulables

2.4.3.1. INTRODUCTION

Le terme de production modulable concerne les technologies dont on peut piloter et planifier la production. Le nucléaire, l'hydraulique de barrage, la production thermique fossile centralisée (gaz et charbon), le turbinage des STEP ainsi que les turbines à combustion sont inclus dans cette catégorie.

Une méthode d'optimisation linéaire bornée sous contraintes est proposée pour modéliser les valeurs horaires de production de chaque technologie modulable. L'optimisation linéaire est une technique souvent utilisée pour représenter la variation des productions électriques modulables, dans les modèles MARKAL (Assoumou, 2006) et

ENERGYPLAN (Lund, 2007) par exemple. On cherche alors à minimiser le coût de la production d'électricité en fonction des contraintes données, par exemple :

- respect de l'équilibre offre-demande : à chaque heure la production est exactement égale à la demande ;
- productible maximum sur une période donnée ;
- contraintes de variation en puissance (réactivité de la technologie à une variation de la demande) ;
- minimum et maximum de puissance délivrée.

Les technologies modulables sont d'abord décrites puis on expose la formulation mathématique du problème d'optimisation. L'identification des paramètres et la validation du modèle sont ensuite présentées.

La nomenclature présentée en début de chapitre et les définitions suivantes seront utilisées dans l'ensemble des paragraphes suivants.

Définitions

- Capacité installée : constante donnant la somme de la puissance installée en MW d'une technologie sur le parc français métropolitain. Équivaut à la puissance maximum théorique que peut fournir la technologie.
- Disponibilité d'une technologie : représente la part de la capacité installée de la technologie étant en état de fonctionner (i. e. qui n'est pas en état de maintenance ou subissant un arrêt accidentel). Cette disponibilité est définie pour toutes les technologies modulables, barrage hydraulique et STEP compris, qui peuvent également subir des arrêts de maintenance. Sa valeur est journalière et exprimée en fraction (0 -1) de la capacité installée.
- Productible : quantité d'énergie maximale générée par une technologie sur une période donnée. Elle peut correspondre par exemple à l'énergie variable contenue dans les réservoirs des STEP ou a une valeur fixe (hydraulique de lac).
- Demande restante, ou résiduelle : demande en électricité que doivent satisfaire les technologies modulables. Correspond à la demande totale (consommation nationale, pompage des STEP et exports) de laquelle on a soustrait la production fatale. Elle est définie à chaque heure.

2.4.3.2. DESCRIPTION DES TECHNOLOGIES

i. Nucléaire

Description

Les centrales nucléaires constituent la principale source d'électricité en France. 58 réacteurs sont en fonctionnement, répartis dans 19 centrales sur le territoire français pour 63.1 GW de puissance installée. On considère généralement que la production nucléaire est une production de base, c'est-à-dire fonctionnant plus de 5000 h par an. Pourtant, l'analyse des courbes de production d'électricité montre que le nucléaire participe également à la variation de production saisonnière et journalière. En raison d'une particularité technique, les centrales françaises ont une capacité de modulation supérieure aux centrales thermiques

fossiles, au prix d'un rendement un peu moins élevé que les autres centrales européennes, espagnoles par exemple⁴⁵.

Les réacteurs nucléaires se classent en trois groupes de puissance :

- Le palier 900 MW constitué par les groupes les plus anciens, concerne 34 réacteurs mis en service entre 1977 et 1987
- Le palier 1300 MW comporte 20 réacteurs mis en service entre 1985 et 1993
- Le dernier palier, 1500 MW regroupe les 4 derniers réacteurs, mis en service entre 1996 et 1999

Les problèmes de sécurité du réseau et notamment le besoin de réserve pour faire face à un défaut de production d'un des groupes est d'autant plus important que le groupe pouvant faire défaut est de grande puissance. A titre de comparaison, la puissance maximale par groupe des autres centrales thermiques se monte à 600 MW, pour la centrale de Cordemais⁴⁶ par exemple. Il est difficile de prendre en compte ce facteur qui dépend également des autres moyens productifs en jeu.

La production des centrales nucléaires peut être affectée par différents facteurs: indisponibilité technique des réacteurs, indisponibilité locale du réseau de transport, limitation des rejets thermiques dans les cours d'eau ou défaut de demande d'électricité du réseau. Ces facteurs sont groupés en deux indicateurs : le coefficient de disponibilité k_d (pour les indisponibilités techniques) et le coefficient d'utilisation k_u . Le produit de ces deux coefficients donne le coefficient de production k_p qui représente l'utilisation effective des centrales par rapport à la puissance installée. Ce coefficient varie au long de l'année (les arrêts de maintenance ou dus aux rejets thermiques étant plus fréquents en été par exemple). Les valeurs moyennes annuelles historiques du coefficient de production des centrales nucléaires ($k_p = k_u \times k_d$) sont comprises entre 70,7 % (2009) et 77,6 % (2005).

RTE donne les valeurs de disponibilité journalière du parc nucléaire pour les années 2010 à 2012. Par contre les valeurs du coefficient d'utilisation des centrales ne sont disponibles qu'en moyenne annuelle sur le site de l'UFE. On remarque sur la Figure 41, extrait de l'actualisation 2013 du bilan prévisionnel 2012 publié par RTE, la grande variabilité de la disponibilité du parc nucléaire en fonction des spécificités de chaque année (grève, canicule, problèmes techniques...).

⁴⁵ Source : Entretien avec M. Roudergue (RTE), 28 janvier 2014

⁴⁶<http://energie.edf.com/thermique/carte-des-centrales-thermiques/centrale-thermique-de-cordemais/presentation-52811.html>

Distribution historique de la disponibilité du parc nucléaire français

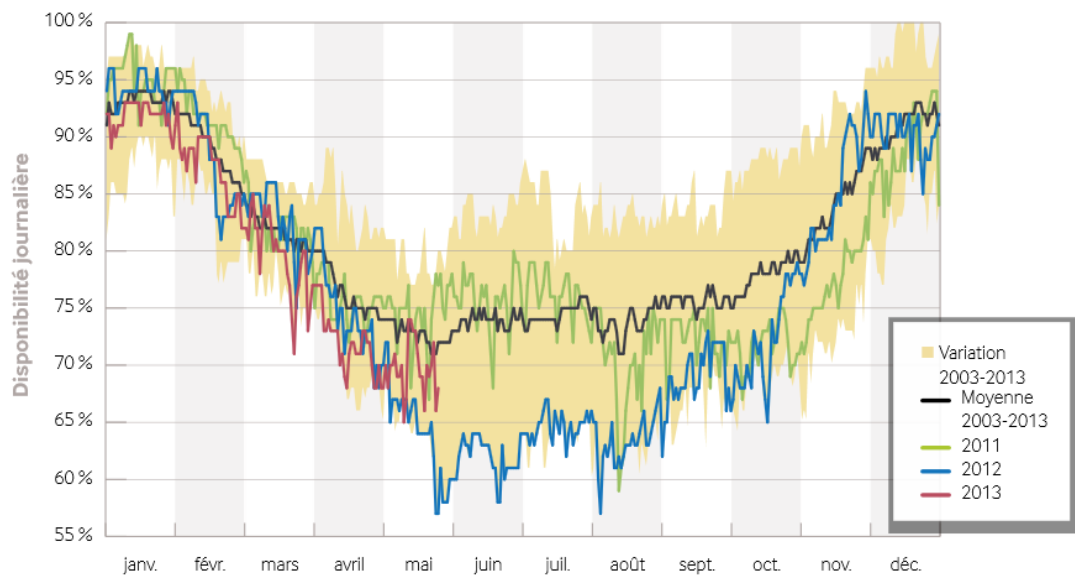


Figure 41 : Disponibilité des centrales nucléaires, source RTE

Caractéristiques retenues pour la modélisation.

Dans le modèle développé, on retient les caractéristiques suivantes pour le fonctionnement du parc nucléaire :

- Le nucléaire est préférentiellement une énergie de base. Son coût v_{nuk} est faible.
- Les centrales nucléaires sont limitées en variation de puissance. Cette limitation est proportionnelle à la capacité disponible (produit de la capacité installée K_{nuk} par la disponibilité D_{nuk}) à l'heure h , soit

$$|p_{nuk,h} - p_{nuk,h-1}| \leq K_{nuk} \times D_{nuk} \times Var_{nuk} \quad 2-27$$

- La limitation en variation de puissance est une contrainte économique forte et peut être différente à la hausse ou à la baisse.
- On calcule une disponibilité journalière à partir des moyennes historiques des années 2009 à 2014. La disponibilité D_{nuk} des centrales est variable sur l'année et présente une saisonnalité forte. Cela donne un coefficient de disponibilité moyen de 77,7 %, plus bas que la moyenne des données historiques annuelles diffusées par l'Union Française de l'Électricité (UFE) pour les années 1999 à 2013, de 80,3 %⁴⁷.
- La valeur du coefficient d'utilisation maximal des centrales ku_{max} baisse lorsque la température extérieure (représentée par une moyenne glissante sur 72 heures) est élevée (canicule et tension sur l'usage de l'eau), et augmente lorsque la demande en électricité est très forte.

$$si \overline{T_{72h}} \geq T_{nuk}, \quad ku_{max} = ku_{max} - \alpha \quad 2-28$$

⁴⁷ <http://www.observatoire-electricite.fr/-Base-de-donnees-de-l-OIE->

$$si Res_h \geq D_{nuk} \times K_{nuk} + D_{fossil} \times K_{fossil}, \quad ku_{max} = 1 \quad 2-29$$

$$p_{nuk,h} \leq K_{nuk} \times D_{nuk} \times ku_{max} \quad 2-30$$

- Le nucléaire participe de façon importante à la réserve de capacité permettant d'assurer la stabilité du système. Le modèle contraint la production nucléaire à une part maximum dans le mix final, i.e. la production nucléaire ne peut satisfaire qu'une part maximale ub_{nuk} de la demande restante en électricité res_h .

$$p_{nuk,h} \leq res_h \times ub_{nuk} \quad 2-31$$

- Les centrales nucléaires sont lentes à mettre en route et à éteindre. Les centrales disponibles sont allumées et donc produisent un minimum d'électricité.

$$p_{nuk,h} \geq K_{nuk} \times D_{nuk} \times lb_{nuk} \quad 2-32$$

ii. Hydraulique Modulable

Description

Le parc des centrales hydrauliques est constitué d'un grand nombre d'unités de production très hétérogènes. La puissance installée peut varier de moins de 20 kW (pico-centrale) à plusieurs dizaines de MW. Il existe aujourd'hui en France environ 2000 petites centrales (puissance inférieure à 10 MW), qui fonctionnent principalement au fil de l'eau et 400 grandes concessions de plus de 4,5 MW. En tout, une puissance de 25,2 GW est installée sur le territoire français, dont 17,6 GW de production modulable (donnée RTE (RTE, 2012)).

Les centrales hydrauliques modulables (donc hors fil de l'eau) sont l'objet de cette partie, la production fatale ayant été traitée précédemment. Les centrales modulables peuvent être classées selon trois types de fonctionnement :

- les centrales éclusées (durée de remplissage du réservoir comprise entre 2 et 200 heures) ajustent leur production à un niveau journalier voire hebdomadaire,
- Les centrales de lac (durée de remplissage supérieure à 200 heures),
- Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage, ou STEP, qui pompent l'eau durant les heures creuses pour la turbiner ensuite en heures de pointes avec un rendement énergétique moyen pour une installation de 80 % environ (Brown, Peas Lopes, and Matos 2008; Gimeno-Gutiérrez et al. 2013 ; (EDF, 2015). Cependant, l'intégration complexe des STEP dans les vallées hydroélectriques et l'effet ponctuel de fortes précipitations induisent un rendement réel observé plus important pour l'ensemble du parc. Selon les chiffres diffusés par RTE⁴⁸ pour les années 2013 et 2014, la consommation des STEP était respectivement de 7,25 et 8,08 TWh pour 6,52 et 6,70 TWh de production. Cela implique un ratio production-consommation de 90 % pour 2013 et 83 % pour 2014. Un ratio de 85 % est considéré dans la suite. Cette valeur pourra être affinée lorsque les données seront disponibles pour d'autres années.

⁴⁸ <http://www.rte-france.com/fr/article/eco2mix>

Outre leur grande diversité, les centrales hydrauliques possèdent deux caractéristiques très importantes au niveau du système électrique :

- Leur coût marginal de fonctionnement est très bas (pas de coût de combustible par exemple)⁴⁹
- Leur réactivité à une forte variation de la demande est très grande

Étant donné sa grande réactivité, l'utilisation de l'hydraulique modulable, en particulier de l'hydraulique de lac, n'est pas basée sur son coût marginal mais sur ce qui est appelé sa « valeur d'usage ». Celle-ci correspond au coût marginal de la technologie qui aurait été utilisée si l'hydraulique n'était pas mobilisable. Sa valeur d'usage moyenne sur l'année se situe un peu en dessous des centrales thermiques, ce qui signifie qu'elle permet d'éviter un peu de nucléaire, et beaucoup de production au gaz, charbon, et fioul.

Cette grande réactivité en fait l'énergie la plus précieuse du système électrique, utilisée à la fois pour suivre la forte montée en charge du matin mais également réservée pour les heures de pointe (fort appel de puissance sur un temps très court). La quasi-intégralité du productible annuel est donc exploité par le réseau. Il faut en effet retrancher des pertes de production liées à des avaries de matériel et un fonctionnement parfois sub-optimal lié à des contraintes d'exploitation, notamment sur les débits des rivières. L'énergie productible annuelle moyenne, représentant l'exploitation optimale des apports naturels, est évaluée en moyenne par le gestionnaire du réseau RTE à 68,1 TWh par an, hors STEP, fil de l'eau inclus (RTE, 2012).

Cela correspond en moyenne, au niveau des unités modulables, à environ 17 TWh venant de l'hydraulique de lac et presque 14 TWh venant des centrales éclusées selon les chiffres du ministère de l'écologie⁵⁰. Cette productibilité est cependant très variable d'une année à l'autre en fonction des données météorologiques, comme le montre la Figure 42. Les productions annuelles historiques vont de 50 TWh en 2011 à plus de 80 TWh en 1994. On constate également sur ce graphe une tendance de production décroissante malgré une capacité installée identique (voire en légère croissance avec le développement récent de la micro-hydraulique).

⁴⁹ Les amortissements des installations ne sont pas compris dans le coût marginal de fonctionnement et, de plus, la plupart des grands barrages sont déjà amortis.

⁵⁰ <http://www.developpement-durable.ex.ouv.fr/IMG/pdf/Hydroelectricite.pdf>

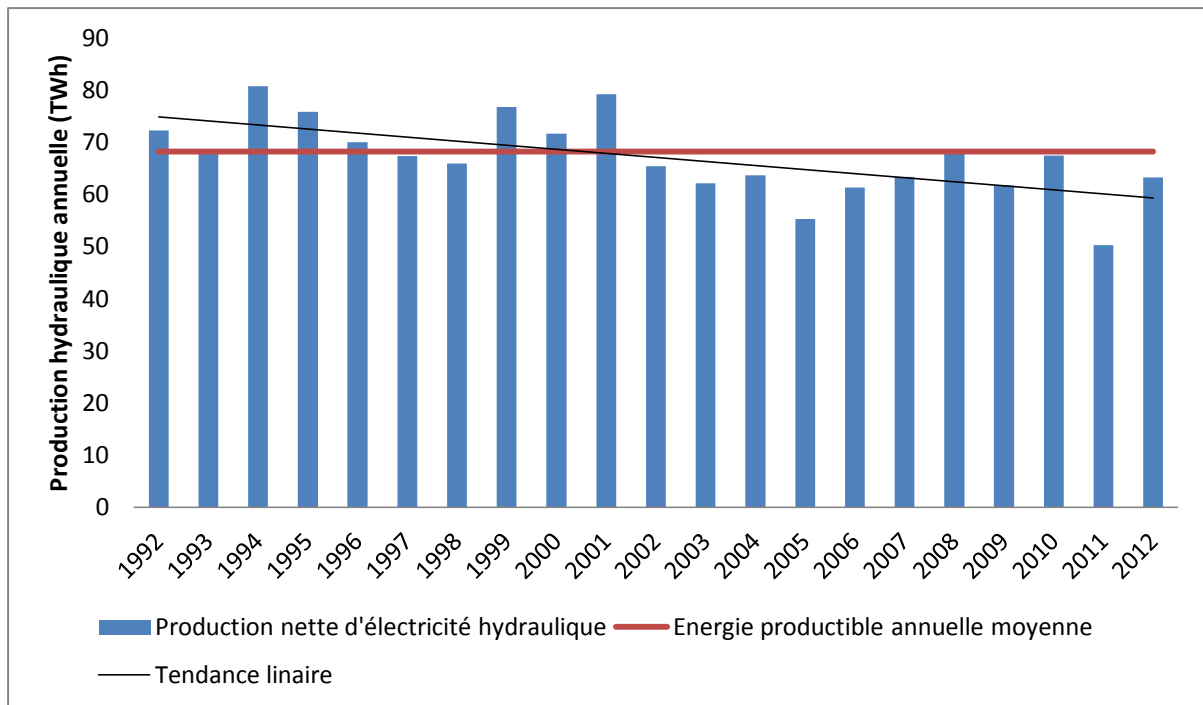


Figure 42: Historique de la production hydroélectrique en France

Cette tendance de production décroissante pourrait s'expliquer en partie, selon RTE, par une perte de rendement liée au vieillissement des installations. Selon RTE, les effets du bouleversement climatique auraient plutôt une influence positive à court terme sur les ressources en eau pour l'hydroélectricité étant donné qu'ils favorisent la fonte des neiges. Ce stock serait alors libéré pour la production hivernale d'électricité au moment où le niveau de consommation est par ailleurs élevé⁵¹. Cependant, un rapport suisse sur les effets du changement climatique sur l'utilisation de la force hydraulique souligne que la production hydraulique pourrait baisser à long terme pour certaines centrales situées en altitude. Le rapport insiste sur les nombreuses incertitudes liées à ces prévisions ainsi que sur la difficulté de généraliser des études sur des centrales particulières (Société suisse d'hydrologie et de limnologie SSHL and Commission d'hydrologie CHy, 2011). La baisse tendancielle de la production hydroélectrique est confirmée mais non expliquée dans le rapport du ministère du développement durable français sur le bilan énergétique de la France en 2014⁵².

La gestion des stocks hydrauliques est un exercice complexe soumis à de nombreux aléas. L'utilisation de l'eau pour produire de l'électricité peut amener des conflits d'usages : alimentation en eau potable, pisciculture, agriculture, industrie (refroidissement des centrales nucléaires par exemple) ou loisirs, notamment en période estivale. L'alimentation en eau potable et le refroidissement des centrales nucléaires en particulier sont deux priorités absolues primant sur la production hydraulique. Pour ne pas détériorer les cours d'eau sur lesquels sont disposés les barrages hydrauliques, ceux-ci doivent également respecter un débit minimal ce qui limite la production lorsque le niveau d'eau est faible. L'optimisation des

⁵¹ Source : entretien avec M. Roudergue (RTE), 28 janvier 2014.

⁵² http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Ref-Bilan_energetique_de_la_France_2014.pdf, p. 104.

STEP s'effectue quant à elle sur la base d'optimisation de rentabilité de la production en lien avec le marché SPOT européen de l'électricité. L'optimisation ne s'effectue plus à l'échelle nationale mais bien sur un raisonnement économique européen (lien avec la production des autres ouvrages, optimisation des périodes de pompage et de turbinage).

La prévision hydrométéorologique et l'optimisation de la production hydroélectrique ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche en France, notamment au sein d'EDF. Les vallées hydroélectriques sont en général composées d'une succession de plusieurs centrales de différents types combinant les paramètres évoqués plus haut. La complexité de l'optimisation de leur production est bien rendue dans les travaux de (Houdant, 2004) et (Florez, 2012), par exemple.

Caractéristiques retenues dans la modélisation

Hydraulique de lac

La modélisation souhaitée devant être adaptée aux objectifs de l'ACV des bâtiments et des quartiers, nous avons opté pour une représentation simplifiée de la production basée sur trois caractéristiques principales, en plus de la disponibilité des installations :

- Son coût marginal de production est très faible.
- La variation maximum de production est proportionnelle à la disponibilité des centrales. La grande réactivité des installations leur permet de suivre finement la courbe de charge, les barrages ont peu de contraintes de variation de production.

$$|p_{hydro,h} - p_{hydro,h-1}| \leq K_{lac} \times D_{lac} \times Var_{lac} \quad 2-33$$

- En conséquence des deux caractéristiques précédentes : le productible annuel est exploité dans sa totalité.

$$\sum_N \sum_{h \in N} p_{hydro,h,T} = Lac_{tot} \quad 2-34$$

Le productible annuel est réparti sur l'année selon une courbe d'usage. La courbe d'usage est déterminée à partir des données historiques de production hydraulique (fil de l'eau et barrages) de 2008 à 2014. La courbe d'usage de la production hydraulique modulable a une forme similaire à la variation de la consommation nationale, en moins contrastée. Elle est représentée sur la Figure 43.

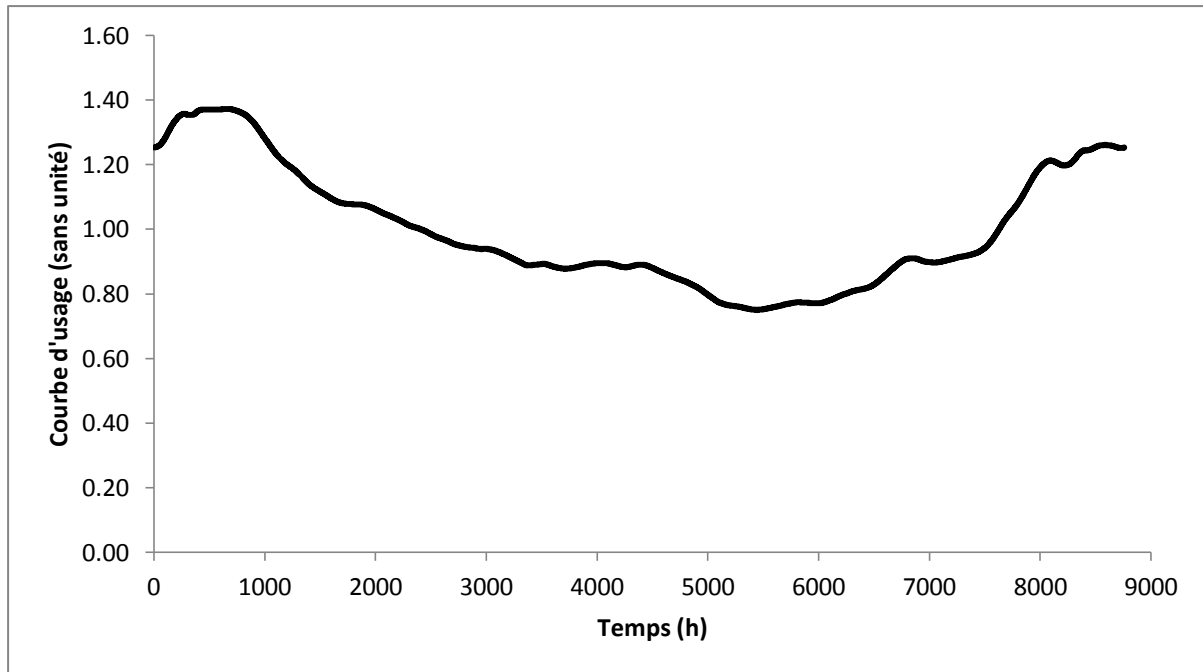


Figure 43 : Détermination du productible hydraulique, Courbe d'usage

Le productible sur une période est le produit du productible moyen horaire (sur les H heures d'une année complète) par la somme des valeurs de la courbe d'usage sur la période N considérée, soit :

$$Lac_N = \frac{Lac_{tot}}{H} \times \sum_{h \in N} U_h \quad 2-35$$

Un minimum et un maximum horaire de production hydraulique sont également définis pour représenter des contraintes de production trop complexes à intégrer ici : instabilité des apports en eau, taille variable des lacs de barrage, fonctionnement complexe des vallées hydrauliques. La production maximum est proportionnelle à la disponibilité des centrales. La production minimum dépend des ressources en eau disponibles. En effet, plus les ressources en eau sont abondantes, plus une partie importante de ces ressources ne sera pas modulée (p. ex. si les réservoirs sont saturés, on ne peut conserver la ressource pour plus tard). Si la production d'hydraulique de lac était parfaitement modulable, elle atteindrait fréquemment une production nulle. L'étude des données historiques de 2013 montre que la relation entre minimum de production des centrales de lac et ressources en eau n'est pas linéaire. On introduit donc un facteur de puissance p_{lac} dans l'équation 4-32 :

$$p_{hydro,h} \geq \left(\frac{Lac_N}{\sum_{h \in N} 1} \times K_{hydro} \times lb_{hydro} \right)^{p_{lac}} \quad 2-36$$

$$p_{hydro,h} \leq K_{hydro} \times D_{hydro} \times ub_{hydro} \quad 2-37$$

où lb_{hydro} et ub_{hydro} sont des paramètres à déterminer, K_{hydro} est la capacité installée en hydraulique modulable, D_{hydro} est le pourcentage de centrale disponible. $p_{hydro,h}$ est la production hydraulique modulable à l'heure h .

Station de transfert par pompage

Le turbinage est intégré à l'algorithme d'optimisation car il interagit avec les autres groupes de production modulables pour suivre la demande, alors que la variation du pompage est plutôt guidée par la demande. Les caractéristiques des STEP sont proches de l'hydraulique de lac :

- Étant peu contraintes sur leur variation en puissance ($Var_{STEP} = 1$), leur variation dépend de la capacité installée K_{STEP} et de la disponibilité des centrales D_{STEP} .

$$|p_{STEP,h} - p_{STEP,h-1}| \leq K_{STEP} \times \widetilde{D}_{STEP} \times Var_{STEP} \quad 2-38$$

- Sur chaque période, on s'assure de produire grâce aux STEPs l'équivalent de ce qui a été pompé, ce qui permet de s'affranchir d'un suivi précis du stock des STEPs.
- La disponibilité des STEP \widetilde{D}_{STEP} est liée au niveau de pompage. En effet, si une station de STEP est en train de pomper de l'eau, alors on considère qu'elle n'est pas en mesure de turbiner :

$$\widetilde{D}_{STEP} = D_{STEP} - C_{STEP} \quad 2-39$$

iii. Gaz et Charbon Centralisé

Description

On regroupe sous ce vocable les centrales à charbon et les centrales à cycle combiné gaz. C'est une production « dispatchable », c'est-à-dire modulable en fonction de la demande en électricité.

Au niveau du parc centralisé on comptait début janvier 2013 une puissance installée de 6,9 GW de production charbon, dont 4 GW de groupes anciens (mis en service avant 1971) et 5 groupes plus récents (années 80). Concernant la production à base de gaz, les différents groupes, tous récents (mis en service après 2003), totalisent 4,5 GW de puissance installée.

Ces technologies ont été groupées dans le modèle bien qu'elles soient assez différentes. On a constaté de fréquentes inversions entre le prix du charbon et du gaz ces dernières années, comme illustré sur la figure ci-dessous qui montre l'évolution théorique des coûts marginaux de production pour les cycles combinés gaz et les centrales au charbon depuis janvier 2007. L'essor récent de l'exploitation des gaz de schistes aux États-Unis a entraîné une baisse du prix du charbon en Europe. Parallèlement, l'échec du marché des quotas de CO₂ qui reste à un niveau très bas pour cause de crise économique renforce également l'intérêt du charbon (RTE, 2012).

Évolution théorique des coûts marginaux de production pour deux cas types de cycle combiné au gaz et de groupe au charbon

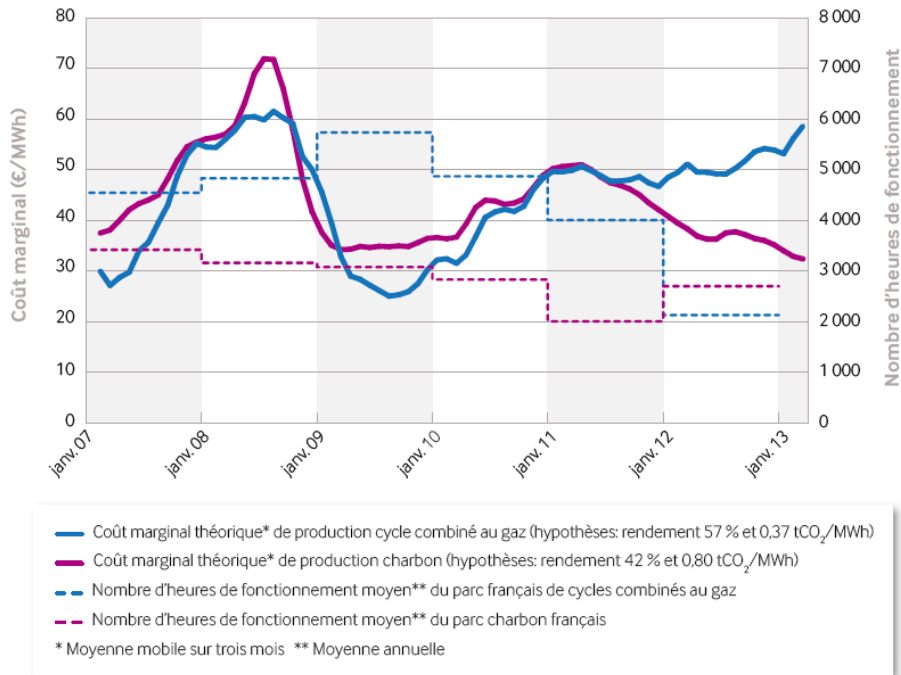


Figure 44 : Évolution des coûts marginaux des centrales au gaz et au charbon, source RTE

La complexité des mécanismes économiques et/ou géopolitiques liés au gaz et au charbon nous ont donc contraints à grouper ces deux technologies. Cependant, on peut remarquer qu'elles sont utilisées de la même façon au niveau du système électrique : elles ont un fonctionnement de semi-base, modulent peu sur la journée et sont suffisamment chères pour être appelées après les centrales nucléaires et hydrauliques. Leurs coûts de fonctionnement restent cependant largement inférieurs aux turbines à combustion et aux centrales fonctionnant au fioul lourd.

Caractéristiques retenues pour la modélisation

Les technologies gaz et charbon ont été groupées dans la modélisation.

- La production maximale des groupes est bornée par la disponibilité des centrales :

$$p_{fossil,h} \leq K_{fossilx} \times D_{fossilx,h} \tag{2-40}$$

- La variation en puissance maximum des groupes fossiles est supposée proportionnelle à leur disponibilité, soit :

$$|p_{fossilx,h} - p_{fossilx,h-1}| \leq K_{fossilx} \times D_{fossil,h} \times Var_{fossilx} \tag{2-41}$$

- On considère également la possibilité d'un minimum de production dépendant des centrales disponibles :

$$p_{fossil1,h} \geq C_{fossil1} \times D_{fossil1,h} \times lb_{fossil1} \tag{2-42}$$

iv. Technologies de pointe et importations

Le parc électrique français compte actuellement 5,3 GW de groupe fonctionnant au fioul lourd et 1.9 GW de turbines à combustion en cycle ouvert. Ces chiffres sont amenés à évoluer prochainement, en particulier pour les groupes fioul, qui ont tous plus de 30 ans, et dont la capacité devrait diminuer de 3,8 GW d'ici à fin 2015 (RTE 2012).

La grande majorité des 6 sites de production comportant des turbines à combustion fonctionnent au fioul léger (comme le diesel), sauf le site de Gennevilliers qui fonctionne au gaz (210 MW). Le site le plus récent, Montereau, est bi-combustion et peut fonctionner avec du gaz ou du fioul léger pour faire face à d'éventuelles difficultés d'approvisionnement.

Si la participation de ces technologies est très faible en part relative dans le mix annuel français (autour de 0,5 à 1 TWh, soit moins de 1 %), elles sont très importantes pour la sécurité du système électrique. Elles permettent de pallier un arrêt impromptu dû à un incident technique, notamment lorsque l'hydraulique est déjà utilisée à son plein potentiel. Le fioul et les turbines à combustion sont aussi des moyens de production dont le bilan environnemental est problématique, notamment au niveau climatique mais aussi concernant la santé humaine (émission de polluants dans l'air).

Les technologies de pointe (centrales au fioul, turbines à combustion gaz ou diesel) et les importations sont les dernières possibilités disponibles et les plus coûteuses pour satisfaire la demande en électricité. Leur coût marginal est donc très haut mais elles n'ont pas de contrainte de production.

2.4.3.3. FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME D'OPTIMISATION

L'algorithme d'optimisation cherche à minimiser le coût de production de l'électricité en fonction des contraintes existantes.

L'année est découpée en 12 périodes N de 730 heures (nombre d'heures moyen dans un mois « type ») et l'optimisation est effectuée sur chaque période, ce qui permet de tenir compte de la variation du productible hydraulique au cours de l'année (voir paragraphe 2.4.3.2.ii). Le pas de temps mensuel est également utilisé dans les travaux de Raichur et al. (Raichur et al., 2015) pour l'évaluation du productible hydraulique. Une échelle hebdomadaire est utilisée dans (Abdelouadoud et al., 2015) grâce à un traitement statistique.

Le problème est de la forme :

$$\min_{P_N} J(P_N) \tag{2-43}$$

avec $P_N \in C$ et $CC = \{P_N \in K \in R^n, \quad h(P_N) = 0, \quad g(P_N) \leq 0\}$

Où la fonction J représente la fonction-coût à minimiser, h est la fonction représentant les contraintes d'égalité et g est la fonction représentant les contraintes d'inégalité. C est l'ensemble des solutions admissibles.

Afin d'assurer l'existence d'une solution, il faut que C soit un sous-ensemble fermé non vide de R^n et que J soit continue et coercive sur K . L'unicité de la solution s'obtient de plus si C est convexe et borné et que J est strictement convexe.

Déclaration des variables

On définit le vecteur solution P_N de production horaire d'électricité sur la période N pour l'ensemble des technologies :

$$P_N = \begin{bmatrix} P_{1,N} \\ \dots \\ P_{n,N} \end{bmatrix} \text{ où } P_{i,N} = \begin{bmatrix} p_{i,1} \\ \dots \\ p_{i,H} \end{bmatrix} \quad 2-44$$

Où les composantes $p_{i,h}$ du vecteur $P_{i,N}$ représentent la production de la technologie i à l'heure h de la période N.

Chaque production est associée à un coût de production, variant suivant la technologie mais identique au cours de l'année. Ce coût est représenté par le vecteur V_N , composé de n vecteurs (un pour chaque technologie) de H composantes $v_{i,h}$ identiques. On a :

$$V_N = \begin{bmatrix} V_1 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} \text{ où } V_i = \begin{bmatrix} v_{i,1} \\ \dots \\ v_{i,H} \end{bmatrix} \quad 2-45$$

Le vecteur Res_N représente le vecteur dont les composantes donnent la demande horaire restante à couvrir sur chaque heure de la période N :

$$Res_N = \begin{bmatrix} res_1 \\ \dots \\ res_H \end{bmatrix} \quad 2-46$$

Le vecteur $C_{step,N}$ représente les consommations d'électricité horaire du pompage des STEP sur la période N :

$$C_{step,N} = \begin{bmatrix} c_{step,1} \\ \dots \\ c_{step,H} \end{bmatrix} \quad 2-47$$

Construction de la fonctionnelle J et des fonctions de contraintes h et g

On pose :

$$J(X) = V_N' \times X \text{ et } X \in C \quad 2-48$$

La fonction coût est linéaire, elle est donc convexe mais pas strictement convexe. Elle est coercive⁵³. On impose que les fonctions représentant les contraintes soient linéaires et continues afin de garantir la convexité de C, soit

$$h(X) = A_{eq} \times P_N - b_{eq} \quad 2-49$$

$$g(X) = A \times P_N - b \quad 2-50$$

Le sous ensemble K de R^n est borné par des bornes inférieures et supérieures afin d'assurer que C soit un ensemble borné, soit

⁵³ La limite de J quand la norme de X tend vers $+\infty$ est bien $+\infty$, les coûts et les niveaux de production étant tous supérieurs ou égaux à zéro.

$$lb \leq P_N \leq ub \quad 2-51$$

L'existence de la solution de l'algorithme est assurée. Par contre, il peut y avoir plusieurs solutions optimales.

Sur chaque période N de H=730 heures, le problème d'optimisation peut alors s'écrire de la forme :

$$\min_{P_N} (P_N' \times \text{diag}(V_N) \times P_N) \text{ tel que } \begin{cases} A \times P_N \leq b \\ A_{eq} \times P_N = b_{eq} \\ lb \leq P_N \leq ub \end{cases} \quad 2-52$$

La signification physique et la formulation mathématique de ces éléments sont expliquées ci-après.

On pose arbitrairement l'ordre suivant pour les technologies :

1. Hydraulique modulable
2. Nucléaire
3. Fossile, groupe 1
4. Fossile, groupe 2
5. Pointe
6. STEP

On peut alors exprimer chaque matrice de contrainte (A, A_{eq}) comme une matrice par bloc ou diagonale par bloc, selon la nature de la contrainte, chaque bloc correspondant à une technologie :

$$A_c = [[A_{hydro}] \quad [A_{nuk}] \quad [A_{fossil1}] \quad [A_{Pointe}] \quad [A_{step}]] \quad 2-53$$

$$A = \begin{pmatrix} [A_{hydro}] & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & [A_{step}] \end{pmatrix}$$

Le vecteur solution P_T devient :

$$P_N = \begin{bmatrix} P_{hydro,N} \\ P_{nuk,N} \\ P_{fossil1,N} \\ P_{fossil2,N} \\ P_{Pointe,N} \\ P_{STEP,N} \end{bmatrix} \quad 2-54$$

Les deux notations (par indice ou par technologie) sont alternativement utilisées dans la suite afin de trouver le meilleur compromis entre lisibilité des équations et compréhension physique des contraintes sur les technologies.

Formulation des contraintes d'égalité : $A_{eq} \times P_N = b_{eq}$

On considère trois contraintes d'égalité : le respect de l'équilibre offre-demande $A_{eq,1}$, la consommation intégrale du productible des STEP sur la période $A_{eq,2}$ et la consommation intégrale du productible hydraulique modulable sur la période $A_{eq,3}$.

La contrainte du respect de l'équilibre offre demande impose qu'à chaque heure de la période N (de H heures), la somme des productions soit égale à la demande restante à satisfaire. On définit donc la matrice $A_{eq,1}$ de $(n + 1) \times H$ colonnes et H lignes et le vecteur $b_{eq,1}$ de H lignes de la façon suivante :

$$A_{eq,1} = [I_H \quad \dots \quad I_H \quad \dots \quad I_H] \text{ et } b_{eq,1} = Res_N \quad 2-55$$

Avec

$$I_H = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \text{ et } [0] = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad 2-56$$

L'optimisation des cycles de pompage-turbinage des STEP est journalière ou hebdomadaire. Exceptionnellement, une partie de l'énergie pompée peut être stockée sur une durée plus longue, en prévision par exemple d'une forte vague de froid. A l'échelle d'un mois, la quantité d'énergie potentielle stockée grâce au pompage des STEP est donc supposée consommée intégralement sur la période afin de représenter l'intérêt économique des STEP. On pose donc une contrainte d'égalité concernant uniquement les STEP (les blocs concernant les autres technologies pour la contrainte 3 sont nuls):

$$A_{eq,2} = [[0] \quad \dots \quad [0] \quad \dots \quad [A_{step,2}]] \text{ et } b_{eq,2} = \begin{bmatrix} [0] \\ C_{step,N} \times \mu \end{bmatrix} \quad 2-57$$

$$[A_{step,2}]_{H,H} = I_H \text{ et } b_{step,2} = [C_{step,N} \times \mu] \quad 2-58$$

Cette contrainte permet de s'affranchir du suivi du stock d'énergie dans les réservoirs STEP qui peut être perturbé par des apports exogènes (fortes pluies, interactions entre les différents composants d'une vallée hydroélectrique).

Enfin, la 3ème contrainte d'égalité est donnée par la consommation de l'intégralité du productible d'hydraulique de lac sur la période, soit :

$$A_{eq,3} = [I_H \quad \dots \quad [0] \quad \dots \quad [0] \quad [0]] \text{ et } b_{eq,3} = [Lac_N] \quad 2-59$$

La matrice finale des contraintes d'égalité et le vecteur associé sont finalement donnés par :

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} A_{eq,1} \\ A_{eq,2} \\ A_{eq,3} \end{bmatrix} \text{ et } b_{eq} = \begin{bmatrix} b_{eq,1} \\ b_{eq,2} \\ b_{eq,3} \end{bmatrix} \quad 2-60$$

Formulation des contraintes d'inégalité : $A \times P_N \leq b$

Tout comme pour les contraintes d'égalité, on peut exprimer la matrice et le vecteur de contrainte d'inégalité sous la forme d'une concaténation de matrices et vecteurs représentant chacun une contrainte particulière. Soit par exemple pour c contraintes :

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ \dots \\ A_c \end{bmatrix} \text{ et } b = \begin{bmatrix} b_1 \\ \dots \\ b_c \end{bmatrix} \quad 2-61$$

Les contraintes d'inégalité intégrées dans le modèle représentent la réactivité des technologies, leur capacité à suivre la demande, à la hausse ou à la baisse. Cela impose que la variation de la production entre deux heures successives soit limitée. Cette limitation est proportionnelle à la disponibilité des centrales, soit :

$$|p_{i,h-1} - p_{i,h}| \leq K_i \times D_i \times Var_i \quad 2-62$$

Soit une formulation matricielle du type :

$$A_1 = \begin{pmatrix} [A_{1,1}] & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & [A_{1,n}] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [A_{1,hydro}] & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & [A_{1,step}] \end{pmatrix} \quad 2-63$$

$$b_1 = \begin{bmatrix} b_{1,i} \\ \vdots \\ b_{1,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{1,hydro} \\ \vdots \\ b_{1,step} \end{bmatrix} \quad 2-64$$

La formulation matricielle de ces contraintes impose de formuler pour chaque technologie deux inégalités selon que la variation de production soit positive ou négative ($p_{i,t-1} \leq p_{i,t}$ ou $p_{i,t-1} \geq p_{i,t}$), on a donc pour chaque technologie i de 1 à n :

$$[A_{1,i}]_{2H,H} = \begin{bmatrix} A_{i,up} \\ A_{i,dw} \end{bmatrix} \text{ et } b_{1,i} = \begin{bmatrix} b_{i,up} \\ b_{i,dw} \end{bmatrix} \quad 2-65$$

Avec

$$A_{i,up} = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ -1 & \dots & 0 & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}, \quad A_{i,dw} = \begin{pmatrix} -1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 1 & \dots & 0 & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \quad 2-66$$

$$b_{i,up}(i > 1) = K_i \times D_{i,t} \times Var_{i,up}, \quad b_{i,dw}(i > 1) = K_i \times D_{i,t} \times Var_{i,dw} \quad 2-67$$

$$b_{i,up}(1) = K_i \times D_{i,t} \times Var_{i,up} + P_{i,init}, \quad b_{i,dw}(1) = K_i \times D_{i,t} \times Var_{i,dw} - P_{i,init} \quad 2-68$$

Où $P_{i,init}$ est la valeur de la production à la fin de la période précédente (transition entre les périodes d'optimisation). La variation de la production de pointe est supposée non contrainte, on a donc $[A_{1,pointe}] = [0]$ et $b_{1,pointe} = [0]$.

Formulation des bornes : $lb \leq P_N \leq ub$

Les bornes inférieures de production définissent des minimums de production pour les technologies en fonction de la capacité disponible, ce qui correspond à des contraintes comme le coût et la durée importante nécessaire pour réaliser l'arrêt complet de la production pour certaines centrales.

Les bornes supérieures de production correspondent à une intégration de contraintes sur l'utilisation des capacités comme les contraintes de réserve (on conserve de la puissance disponible en cas d'incident sur le réseau) ou les contraintes de rejets thermiques des centrales (limitation de l'utilisation de l'eau de rivière pour le refroidissement des centrales afin de préserver les cours d'eau en évitant un réchauffement trop important de l'eau).

Pour la définition des bornes inférieures et supérieures, on considère les approximations suivantes :

- Les bornes inférieures de production sont proportionnelles à la disponibilité des centrales, sauf pour l'hydraulique de lac. La borne inférieure de production de l'hydraulique de lac est proportionnelle au productible horaire moyen sur la période $\frac{LacN}{h}$. La borne inférieure pour le stock d'énergie des STEP est zéro. On a donc :

$$lb = \left[\left[\frac{LacN}{h} \times lb_{lac} \right]_{h,1} \quad [D_{2,t} \times K_2 \times lb_2]_{h,1} \quad \dots \quad [D_{n,t} \times K_n \times lb_n]_{h,1} \right] \quad 2-69$$

- Les bornes supérieures de production sont généralement proportionnelles aux capacités disponibles. La borne supérieure pour le nucléaire $MaxNuk$ dépend, en plus de la capacité disponible, de la demande restante et de la température extérieure. La borne supérieure du stock des STEP est définie par un stock maximum. Il n'y a pas de borne supérieure pour les technologies de pointe.

$$ub = \left[[D_{1,t} \times K_1 \times ub_1]_{h,1} \quad [MaxNuk_n]_{h,1} \quad \dots \quad [D_{n,t} \times K_n \times ub_n]_{h,1} \right] \quad 2-70$$

Pour le calcul du coefficient d'utilisation Ku (voir 1 et de la borne k_t , on considère les variables suivantes :

- Une valeur de base du coefficient ku_{max} qui correspond à l'utilisation moyenne des centrales.
- Une part maximum de la consommation restante que peut satisfaire le nucléaire afin de conserver une réserve suffisante en cas de défaillance sur le système électrique. On a donc l'expression suivante de $MaxNuk_n$:

$$MaxNuk_n = Min(D_{nuk} \times K_{nuk} \times ku_{max} \mid res_n \times ub_{nuk}) \quad 2-71$$

Choix de l'algorithme de résolution du problème d'optimisation

Une fois la forme du problème déterminée, il faut choisir un algorithme de résolution. Le problème posé est de grande taille (nombreuses variables et contraintes), linéaire et borné. Les méthodes de résolution les plus efficaces disponibles sont les méthodes de point intérieur et dual-simplex.

La méthode de point intérieur est rapide et plus performante que la méthode dual-simplex pour ce problème. On conserve donc un algorithme de point intérieur.

L'ensemble des paramètres ont été identifiés sur l'année 2013 et le modèle final a été validé sur l'année 2014.

2.4.3.4. IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES DE MODÉLISATION

Sur chaque période, on cherche l'unique solution au problème d'optimisation linéaire donnant à chaque heure la production de chaque technologie au moindre coût d'ensemble. En effet, la production du groupe de pointe n'est pas contrainte, la satisfaction de la demande est donc toujours assurée.

Premièrement, on fixe arbitrairement, par construction, les paramètres suivants :

- $V_{pointe} = \mathbf{1}$: Les coûts des technologies sont des coûts relatifs. Ils sont fixés entre 0 et 1. Le prix des centrales de pointes, les plus chères, est fixé à 1. On utilise les technologies de pointes comme étalon pour fixer le prix des autres technologies.
- $V_{hydro} = V_{step} = \mathbf{0}$: L'hydraulique (lac ou STEP) est utilisée en fonction de sa valeur d'usage (coût de la technologie qu'elle remplace en produisant) et non de son coût marginal de production, qui est très faible. On fixe donc son coût à zéro dans le modèle. L'utilisation de l'hydraulique permet de diminuer le coût total de la production d'électricité en utilisant un productible au coût négligeable mais dont les ressources sont limitées et entièrement consommées sur la période.
- $Var_{step} = \mathbf{1}$: Les STEP sont des technologies très réactives, on ne les borne pas en variation de puissance (variation maximum possible équivalente à la capacité disponible).
- $lb_{step} = \mathbf{0}$: La valeur minimale de production des STEP est nulle.
- $ub_{foss} = ub_{step} = \mathbf{1}$: Le maximum de production des technologies fossiles et STEP équivaut à leur capacité disponible.

Lorsque c'est possible, les paramètres restants sont identifiés à partir des productions réelles de l'année 2013. Le détail des observations est donné en Annexe I. Les valeurs suivantes ont été fixées à partir des observations sur 2013 :

- $Var_{nuk-up} = \mathbf{9\%}$ de la capacité disponible
- $Var_{nuk-dw} = \mathbf{12\%}$ de la capacité disponible
- $Var_{hydro,up} = \mathbf{16,2\%}$ de la capacité disponible
- $Var_{hydro,dw} = \mathbf{19,6\%}$ de la capacité disponible
- $Var_{foss,up} = \mathbf{12,0\%}$ de la capacité disponible
- $Var_{foss,dw} = \mathbf{13,6\%}$ de la capacité disponible
- $lb_{hydro} = \mathbf{24,1\%}$ de la capacité disponible
- $ub_{nuk} = \mathbf{98,3\%}$ de la demande résiduelle en électricité
- $lb_{pointe} = \mathbf{30 MW}$
- $lb_{foss1} = \mathbf{1\%}$ de la capacité disponible

Les paramètres restants (coûts nucléaire et fossiles, paramètres de limitation de la production nucléaire) sont identifiés par calibrage sur 2013. L'algorithme utilisé pour l'identification des paramètres est un algorithme d'optimisation non linéaire sous contrainte par méthode de point intérieur.

On cherche à minimiser l'erreur quadratique moyenne absolue (RMSE) sur l'ensemble des heures h de l'année et l'ensemble des technologies j entre l'estimation du modèle $\widetilde{p}_{h,j}$ et les données diffusées par RTE $p_{h,j}$ (Equation 2-72).

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{H} \times \sum_j \sum_h |\widetilde{p}_{h,j} - p_{h,j}|^2} \quad 2-72$$

Le Tableau 18 donne le résultat de l'optimisation des paramètres restants sur l'année 2013. On notera que les coûts des différentes technologies ne représentent pas des valeurs réelles mais bien des coûts relatifs des technologies les unes par rapport aux autres. Ce coût peut également intégrer des contraintes non modélisées. Les bornes de variations possibles des paramètres ont été volontairement restreintes en fonction des connaissances acquises sur le fonctionnement du système électrique.

Tableau 18 : Production modulable : résultat de l'optimisation des paramètres restants

Paramètres	Bornes	Valeur optimisée
$V_{fossil1}$	$10^{-8} \leq C_{fossil1} \leq 1$	0,144
V_{nuk}	$10^{-8} \leq C_{nuk} \leq 1$	0,022
ku_{max}	$0,95 \leq ku_{max} \leq 1$	0,98

2.4.3.5. VALIDATION DE LA MODÉLISATION DE LA PRODUCTION MODULABLE

Les paramètres de contraintes de production pour le modèle d'optimisation ont été calibrés sur l'année 2013 par minimisation de l'erreur moyenne sur l'ensemble des cinq technologies modélisées.

Le résultat de la modélisation est présenté d'abord sur l'année de calibrage (2013) puis sur l'année 2014 afin de vérifier que les performances du modèle sont stables. La demande nationale réelle (consommation intérieure, exportations, pompage) ainsi que la production fatale réelle (hydraulique fatale, éolien, photovoltaïque, thermique décentralisée) ont été utilisées en entrée du modèle pour définir la demande résiduelle à satisfaire.

Concernant l'hydraulique, la production éclusée n'étant pas disponible autrement que groupée à l'hydraulique au fil de l'eau, elle est considérée comme fatale à 100 %. Les 15 derniers jours de l'année 2014 n'ont pas été comptabilisés car les disponibilités des centrales ne sont plus disponibles sur le site de RTE.

L'année 2013 a été marquée par un niveau de précipitation important entraînant une forte production des centrales hydrauliques. L'année a également été assez froide, surtout au premier trimestre. A l'inverse, l'année 2014 a été particulièrement chaude en hiver et plutôt froide en été, ce qui a entraîné une baisse importante de la consommation sur l'année

(baisse estimée à 27,6 TWh par RTE⁵⁴). Ces deux années, assez contrastées, permettent de tester le modèle dans deux configurations différentes.

Les résultats de cette validation en matière d'erreurs moyennes relatives (MAPE) et de coefficient de corrélation (COR) pour chaque groupe de technologie modulable sont présentés dans le Tableau 19 pour 2013 et dans le Tableau 20 pour 2014. La production totale calculée sur l'année est également présentée dans les cas où celle-ci n'est pas une donnée exogène (p. ex. hydraulique de lac).

On définit également l'erreur globale E_{Glob} , et respectivement l'erreur relative globale $E_{Glob\%}$, comme la moyenne sur l'ensemble des heures de l'année de la somme des valeurs absolues des erreurs sur chaque technologie j à l'heure h divisée par la production totale à la même heure, soit :

$$E_{Glob\%} = \frac{1}{\sum_h 1} \times \sum_h \frac{\sum_j |P_{j,h} - \widetilde{P}_{j,h}|}{\sum_j P_{j,h}} \times 100 = \frac{1}{\sum_h 1} \times \sum_h \sum_j MAPE_{j,h} \quad 2-73$$

$$E_{Glob} = \frac{1}{\sum_h 1} \times \sum_h \sum_j |P_{j,h} - \widetilde{P}_{j,h}| = \frac{1}{\sum_h 1} \times \sum_h \sum_j MAE_{j,h} \quad 2-74$$

Où $P_{j,h}$ représente la production mesurée (RTE) de la technologie j à l'heure h et $\widetilde{P}_{j,h}$ représente la production modélisée de la technologie j à l'heure h .

Tableau 19 : Validation du modèle de production modulable sur 2013

Technologie	Erreur Moyenne : MAE(MW)	Erreur relative : MAPE (%)	Coefficient de corrélation, COR	Total 2013 modélisé (TWh)	Total 2013 RTE (TWh)	Capacité installée (GW)
Hydraulique de lac	732	32,2	0,81	/	19,7	9,1
Nucléaire	800	1,75	0,99	405,8	403,2	63,1
STEP	424	57,2	0,76	6,5	6,5	4,3
Charbon et Gaz	848	26,9	0,90	24,6	27,0	10,4
Pointe	27	51,1	0,10	0,3	0,5	10,0
Hydraulique (lac+STEP)	950	31,5	0,85	/	26,2	13,4
Erreur Globale	2831	5,5				

⁵⁴ http://www.rte-france.com/sites/default/files/bilan_electrique_2014.pdf

Tableau 20 : Validation du modèle de production modulable sur 2014

Technologie	Erreur Moyenne : MAE (MW)	Erreur relative : MAPE (%)	Coefficient de corrélation, COR	Total 2014 modélisé (TWh)	Total 2014 RTE (TWh)	Capacité installée (GW)
Hydraulique de lac	607	31.1	0,85	/	14,2	9,1
Nucléaire	737	1,6	0,99	339,0	337,6	63,1
STEP	331	42,5	0,83	5,7	5,7	4,3
Charbon et Gaz	553	43,7	0,82	7,7	9,2	10,3
Pointe	21	78,9	0,00	0,2	0,2	10,0
Hydraulique (lac+STEP)	731	26,8	0,90	/	19,1	13,4
Erreur Globale	2249	4,5				

Les erreurs relatives (MAPE) sur les technologies autres que le nucléaire peuvent sembler importantes (supérieure à 20 %). Cependant, cette valeur est directement liée à la précision de la modélisation nucléaire. L'erreur relative sur le nucléaire est très faible (moins de 2 %), mais l'erreur moyenne est du même ordre de grandeur que l'erreur moyenne pour les autres technologies. Le nucléaire produit environ 80 % de la production modulable. Une petite erreur sur le nucléaire va se répercuter sur l'ensemble des autres technologies. En effet, la satisfaction de la demande à chaque heure implique qu'une erreur positive sur une technologie à l'heure h donne lieu à une erreur négative sur une ou plusieurs autres technologies à cette même heure et réciproquement. Étant donné les incertitudes portant entre autres sur les comportements individuels des centrales nucléaires (contraintes de rampes, de coût, durée de maintenance) et la variation infra-journalière de la disponibilité des centrales (inconnue), il est difficile de modéliser de façon plus précise la production nucléaire et, par conséquent, la modélisation des productions des autres technologies.

On constate par ailleurs que, d'une année sur l'autre, les coefficients de corrélation et les erreurs moyennes restent stables, malgré les différences de contexte entre les deux années. Le modèle capture donc l'essentiel du fonctionnement du système électrique.

La performance du modèle est basse sur les technologies de pointe : en effet, celles-ci sont appelées en dernier (coût de production important) et leur production est très faible, en particulier sur 2014 où la consommation était particulièrement basse, même en hiver. Des impératifs de maintenance et de vérification des installations de pointe peuvent conduire à l'allumage des centrales alors qu'elles ne sont pas nécessaires pour la satisfaction de la demande. Le modèle développé ne peut capter ces aléas.

2.4.3.6. MIX MARGINAL MOYEN ET PLAGES DE VALIDITÉ DU MODÈLE

Le modèle développé doit pouvoir réagir à une variation marginale de la demande. A capacité installée fixée, seule la production modulable peut satisfaire une demande supplémentaire ou ajuster à la baisse sa production. La production marginale est alors la différence entre la production obtenue pour la demande « type » et la production obtenue pour la demande type à laquelle on a ajouté la demande marginale.

La demande marginale est de l'ordre de la demande d'un bâtiment ou d'un quartier. Elle est donc faible par rapport à la demande « type ». On fait l'hypothèse ici qu'une augmentation faible de la demande n'est pas de nature à changer les exports et le pompage. Seuls le nucléaire, gaz et charbon centralisés, pointe et import, peuvent donc satisfaire cette demande supplémentaire. Le modèle permet de déterminer dans quelle proportion. On considère que la consommation supplémentaire due au projet étudié est trop faible pour impacter les prix de l'électricité et les contrats passés avec les pays voisins ou l'optimisation économique régissant le fonctionnement des stations de pompage.

Concernant la problématique des exports, il est aussi possible de considérer qu'une réduction des exportations française vers d'autres pays serait suivie d'une augmentation de la production dans ces autres pays. Les pays européens étant reliés au même marché européen de l'électricité SPOT, la technologie marginale à l'échelle de l'Europe peut être assimilée à la technologie marginale du pays exportateur. Concernant le pompage, une somme d'effets marginaux de modification des consommations ou l'injection de production locale peuvent entraîner une modification de la stratégie de pompage, dès lors que le minimum de consommation nationale est déplacé. Prendre en compte une modification de cet ordre dans le modèle n'est pas envisageable à court terme. Le fonctionnement du pompage est guidé par les minimums journaliers et hebdomadaires de consommation, dont l'heure d'occurrence ne peut être modifiée par la consommation supplémentaire liée à un bâtiment ou un quartier.

Tests unitaires ou « Dirac » du modèle

Ces tests sont conduits afin de s'assurer que l'utilisation du modèle est stable en marginale, i.e que la différence de production conséquence d'une variation marginale de la consommation ne générerait pas d'erreurs numériques (la différence d'ordre de grandeur entre consommation de référence et consommation marginale étant très importante : potentiellement plus de 8 ordres de grandeur).

Le modèle est donc testé sur des variations marginales de consommation de 1 MW en pulse sur chacune des heures de l'année. Les résultats montrent que le mix marginal à chaque heure est cohérent et stable (i.e. la somme des valeurs absolues de la production des technologies est égale à la consommation marginale), le modèle ne présente donc pas d'instabilité.

Plage de validité du modèle

Afin de déterminer la plage de validité du modèle en fonction de l'ordre de grandeur de la demande marginale, le modèle a été testé sur l'année 2013 pour plusieurs demandes marginales, de 1 W.h⁻¹ à 1 MW.h⁻¹, constant sur l'année.

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 21. L'hydraulique modulable et les STEP ne participent pas au mix marginal. Sur l'ensemble de l'année, le productible total de l'hydraulique de lac est fixé et entièrement utilisé. Une consommation supplémentaire d'électricité peut « déplacer » une production hydraulique mais la quantité totale d'énergie produite ne peut être augmentée.

Tableau 21 : Mix marginal 2013 pour une demande constante entre 10 W et 1 MW

Demande marginale	Hydraulique modulable (%)	Nucléaire (%)	Charbon et Gaz (%)	Pointes (fioul-TAC) (%)	STEP (%)
10 W	0	29,0	70,5	0,5	0
1 MW	0	29,0	70,5	0,5	0

On constate qu'en dessous de 10 W par heure, le modèle n'est plus valide. Cela est dû aux erreurs d'arrondi : le nombre d'ordres de grandeurs entre la demande marginale et la demande type est > à 8. Au dessus de 10 MW par heure, le modèle présente des non-linéarités dues aux effets de seuil de saturation des centrales.

La plage de validité correspond au domaine d'application souhaité du modèle, qui doit permettre d'analyser des consommations d'électricité de bâtiments et de quartiers : la puissance moyenne d'un frigo est supérieure à 10 W et une puissance appelée de 10 MW correspond à la moyenne pour une ville de 13 000 habitants.

Mix marginal moyen « type » à 1 MW

La production marginale est calculée en sollicitant le modèle dans le cadre du fonctionnement « type » avec une consommation nationale augmentée de 1 MW à chaque heure. La variation de production résultante correspond à la production définie comme « marginale moyenne 1 MW ».

Le mix marginal obtenu en réponse à une sollicitation marginale de 1 MW constante sur l'année est présenté dans le tableau suivant.

Tableau 22 : Mix marginal « type » pour 1 MW constant

Technologie	Hydraulique modulable (%)	Nucléaire (%)	Charbon et Gaz (%)	Pointes (fioul-TAC) (%)	STEP (%)
0,1W	0	37,1	61,8	1,0	0
mix marginal constant sur la plage de linéarité du modèle, de 10 W à 10 MW(%)	0	37,1	61,9	1,0	0
100 MW	0	36,8	62,1	1,1	0

L'essentiel de la demande marginale est satisfait par les technologies de semi-base : le gaz et le charbon centralisés. Toutefois, en creux de nuit et les week-ends, ou en période de faible activité (pont de mai, vacances d'août), soit un peu moins de 40 % du temps, le nucléaire est encore disponible pour satisfaire une demande supplémentaire. Les technologies de pointe sont peu mobilisées pour cette demande, sauf lorsque les centrales gaz et charbon sont saturées.

Ce résultat est cohérent avec les résultats obtenus sur 2013 et les informations données par les gestionnaires du réseau qui estiment que 25 % du temps, le nucléaire est le moyen de production marginal et 75 % du temps, ce sont les technologies thermiques fossiles.

Il faut souligner qu'une demande marginale non constante sur l'année donnerait un résultat différent de celui présenté ici.

2.5. VALIDATION GÉNÉRALE ET RÉSULTATS DU MODÈLE

2.5.1. Introduction

Les paragraphes suivants ont pour objectif d'illustrer l'intérêt du modèle à travers la présentation de plusieurs résultats :

- Données générales du modèle sur l'année type et analyse des performances de prévision des impacts en termes d'émissions de GES pour une année proche d'aujourd'hui.
- Une analyse des performances du modèle sur l'année réelle 2014 en utilisant le modèle de référence et les données météorologiques de 2014 (température et vitesse de vent)
- Une représentation des mix moyens mensuels sur les années 2013, 2014 et l'année « type » pour une analyse des variations saisonnières.

Le modèle a pour but d'appuyer de nouvelles méthodologies de calcul des impacts environnementaux liés à la consommation ou à la production d'électricité des bâtiments (approfondi dans le Chapitre 1).

2.5.2. Données générales du modèle sur climat de référence

À partir des données sur les capacités installées prévues pour 2014 par RTE et des données météorologiques type (RT 2012), l'équilibre offre-demande en électricité est reconstitué (consommation et production) pour chaque heure de l'année « type ».

On cherche à vérifier les performances du modèle, c'est-à-dire sa capacité à évaluer les impacts de l'électricité pour une année future proche d'aujourd'hui. Pour cela, on se place à la fin de l'année 2013 et on utilise l'ensemble des données disponibles à cette date-là, ce qui constitue le modèle de référence. On compare ensuite les résultats du modèle aux données réelles 2014-2015 :

- Total annuel de consommation et de production d'électricité : Tableau 23
- Potentiel de réchauffement global sur les mois et sur les heures de l'année : Figure 45

Le potentiel de réchauffement global est évalué selon la méthodologie développée dans (Roux et al., 2016).

Il faudrait bien sûr plus de données pour lisser correctement les aléas climatiques mais se sont les seules disponibles actuellement. Ces valeurs de potentiel de réchauffement global sont comparées à une stratégie alternative : l'utilisation d'un mix annuel moyen « de référence » basé sur les années 2008 à 2013.

Tableau 23 : Equilibre offre-demande généré par le modèle pour une année climatique « type »

Demande (TWh)		Modèle (Climat type)	Mix de consommation (%)
Consommation intérieure		478,8	88,5
Pompage		7,6	1,4
Solde exportateur		54,8	10,1
Total		541,2	-
Production (TWh)	Capacité installée (GW)	Modèle (Climat type)	Mix de production (%)
Nucléaire	63,1	410,7	75,9
Hydraulique (turbinage)	25,1	68,5	12,7
Éolien	8,5	17,6	3,2
Thermique décentralisé non EnR (principalement cogénération) *	3,8	13,3	2,5
Charbon et Gaz	10,4	18,3	3,4
PV	5,1	6,4	1,2
Thermique décentralisé EnR, dont incinération déchets	1,4	6,1	1,1
Fioul et TAC	7,0	0,3	0,1

*3,3 GW gaz et 0,5 GW Fioul

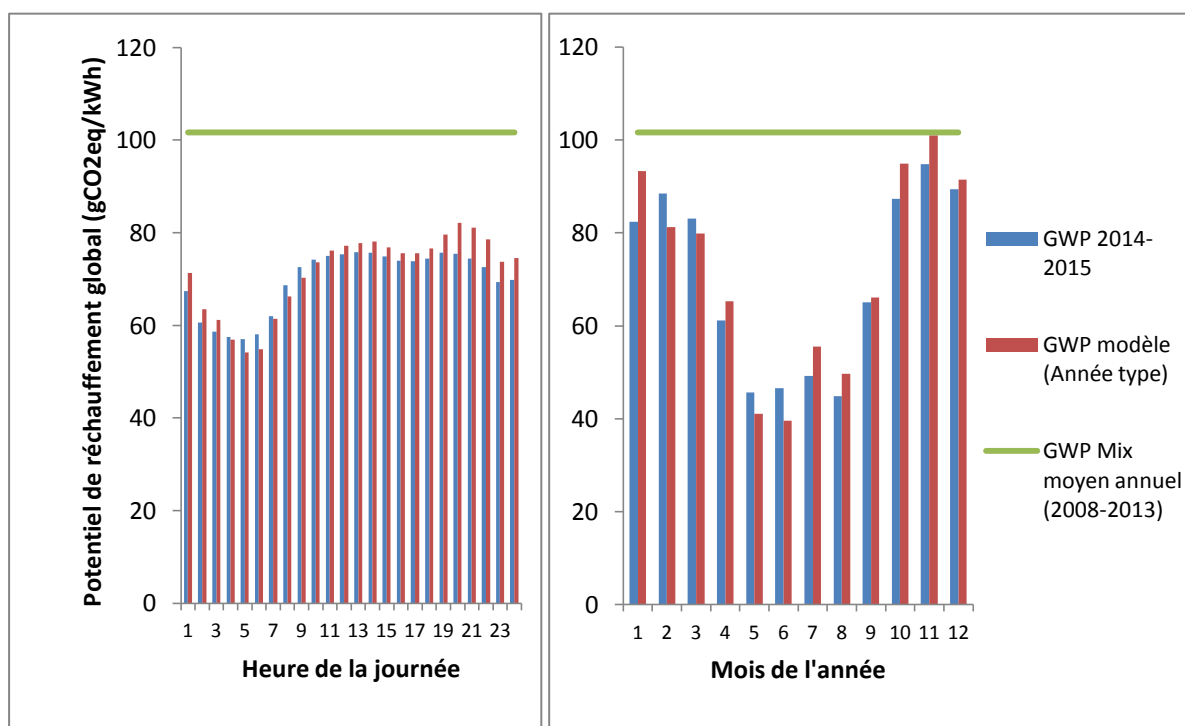


Figure 45 : Performance du modèle sur l'évaluation du potentiel de réchauffement global

On constate que le modèle reproduit de façon beaucoup plus fidèle la variation horaire et la variation mensuelle de l'indicateur de potentiel de réchauffement global par rapport à un mix annuel moyen basé sur l'historique.

2.5.3. Performances du Modèle sur 2014

Les données réelles de l'équilibre offre-demande d'électricité sont disponibles pour l'ensemble de l'année 2014. La validation du modèle a été effectuée sur 2014, en ôtant également la première semaine de janvier pour l'initialisation des données climatiques. Les données réelles de vitesse de vent et de température ont été récupérées sur le site MétéoCiel (www.meteociel.fr) pour les 8 stations utilisées dans le modèle. Cependant, les données de rayonnement solaire ne sont pas disponibles, ce qui rend problématique l'évaluation de la production photovoltaïque. Les données de rayonnement de la RT sont conservées.

Le modèle calcule dans l'ordre : La consommation nationale ; Les productions fatales (éolien, photovoltaïque, thermique fossile décentralisée, thermique renouvelable et assimilée décentralisée, hydraulique fatale) ; Le pompage des STEP ; Les échanges aux frontières (solde net) ; Les productions modulables : nucléaire, hydraulique modulable, thermique fossile centralisée (gaz et charbon), technologies de pointe (fioul, turbine à combustion).

Demande en électricité

Les performances du modèle en matière de représentation de la demande en électricité ont d'abord été évaluées. La demande est constituée de la consommation nationale, du solde des échanges et du pompage des STEP. Pour cette évaluation, les données météorologiques réelles de 2014 sont utilisées. Le Tableau 24 présente les coefficients de performance du modèle calculés sur 2014.

Tableau 24 : Performance de la prévision de demande totale sur 2014

Nom	Abréviation	Demande totale 2014	Consommation nationale 2014	Pompage STEP 2014	Exportations 2014
Biais	MBE	-4,4 TWh -0,8 %	+5,8 TWh 1,3 %	0,03 TWh 0,4 %	-10 TWh (14,7 %)
Erreur moyenne	MAE	2448 MW	2050 MW	688 MW	384,9 MW
Erreur relative	MAPE	4,2 %	3,9 %	-	15,6 %
Erreur quadratique	RSME	3263 MW 5,3 %	2963 MW 5,6 %	658 MW	2556 MW
Coefficient de corrélation	COR	0,94	0,96	0,82	0,59

Le modèle d'exportation est celui qui a le plus de difficulté à reproduire fidèlement les valeurs réelles. Néanmoins cela n'empêche pas la modélisation de la demande totale d'être globalement très performante, avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,9 et une MAPE inférieure à 5 %. C'est en partie dû à la transmission des erreurs. Les exports sont calculés en dernier et les erreurs faites sur la consommation nationale et le pompage des

STEPS sont transmises au modèle d'exportation qui modélise alors à partir de données d'entrées « modélisées ».

La Figure 47 montre la demande réelle et la demande modélisée sur 2014. Le modèle reproduit bien l'allure et les variations de la demande en électricité. Une analyse de la répartition des erreurs, présentée sur la Figure 46 montre que seulement 6 % des erreurs sont supérieures à 10 % de la demande totale, 56 % des erreurs sont inférieures à 4 % de la demande et moins de 6 % sont supérieures à 10 %.

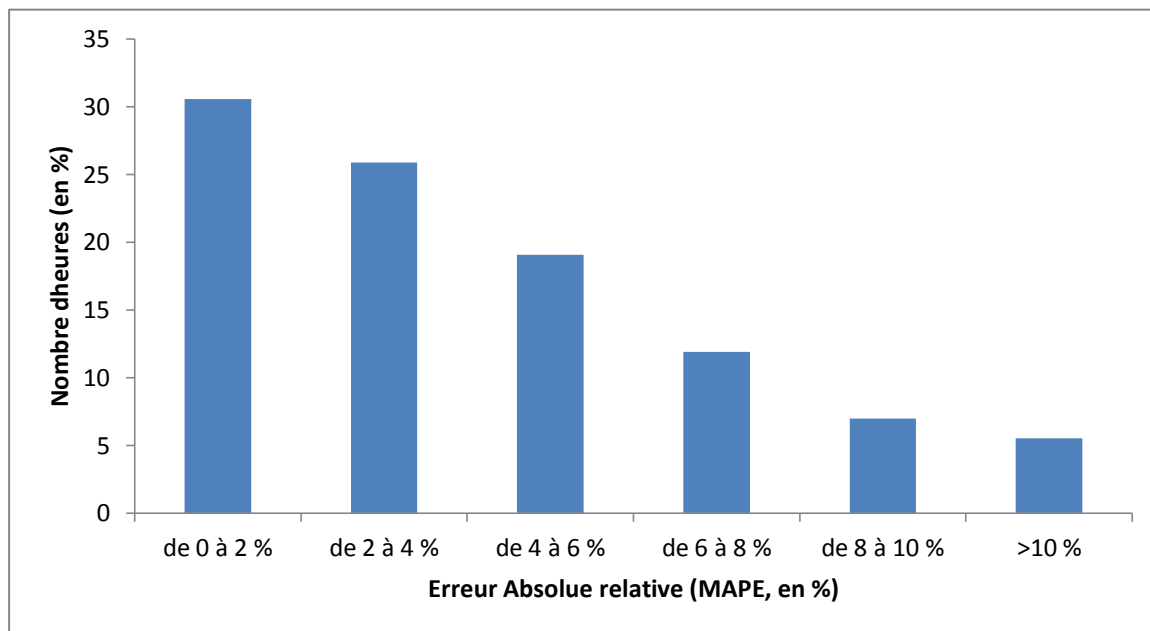


Figure 46 : Répartition des erreurs absolues et relatives sur la modélisation de la demande de 2014

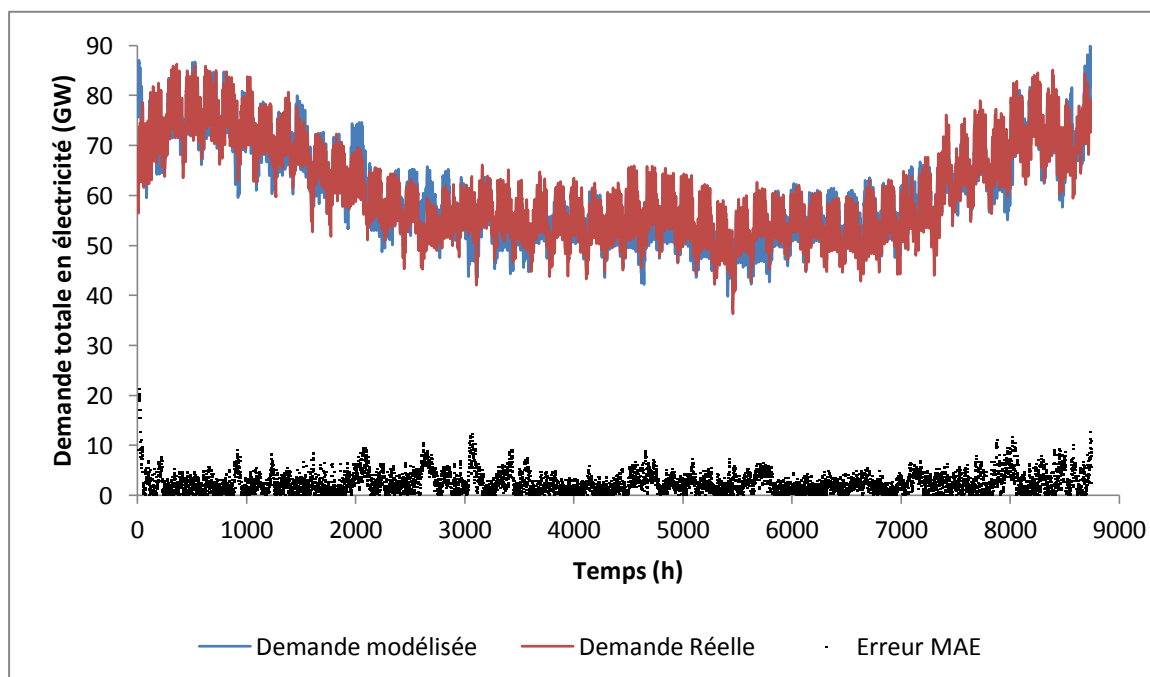


Figure 47 : Demande réelle et demande modélisée pour l'année 2014

Production Hydraulique totale

La production hydraulique est très variable d'une année sur l'autre, en fonction du régime des précipitations et des dynamiques de fonte des neiges. Le modèle n'inclut pas de modélisation climatique des ressources en eau et ne peut donc pas représenter cette variabilité à partir des données météorologiques, par exemple. De plus, les données disponibles pour l'hydraulique fatale incluent l'hydraulique éclusée dans son intégralité. Or l'hydraulique éclusée peut être en partie considéré comme modulable.

Le fonctionnement des vallées hydroélectriques est très complexe. La division des technologies hydrauliques selon leurs caractéristiques principales, telle qu'effectuée dans le modèle, néglige les interactions dans les vallées hydroélectriques. Il est donc important de vérifier la performance du modèle sur le fonctionnement d'ensemble de la production hydraulique, STEP comprise.

La vérification des performances du modèle concernant la production hydraulique (production des STEP incluse) est effectuée en considérant la variation historique des ressources. Si le biais (MBE) sur l'année est relativement faible (0,9 TWh soit 1,4 % de la production hydraulique totale), le coefficient de corrélation est relativement bas (0,65) et l'erreur relative absolue MAPE est de l'ordre de 23 %. La variabilité des ressources en eaux a une grande importance lorsque l'on regarde une année réelle. Cependant le modèle est un modèle de référence donc il lisse cet aléas.

On peut souligner également que l'ensemble des erreurs faites précédemment sur la demande en électricité impacte la modélisation des productions modulables, dont l'hydraulique modulable et le turbinage des STEPs. A titre d'exemple, la performance en terme de coefficient de corrélation pour la production hydraulique modulable totale (STEP incluse) est dégradée à 0,67 contre 0,89 auparavant (voir validation du modèle de production modulable, paragraphe 2.4.3.5).

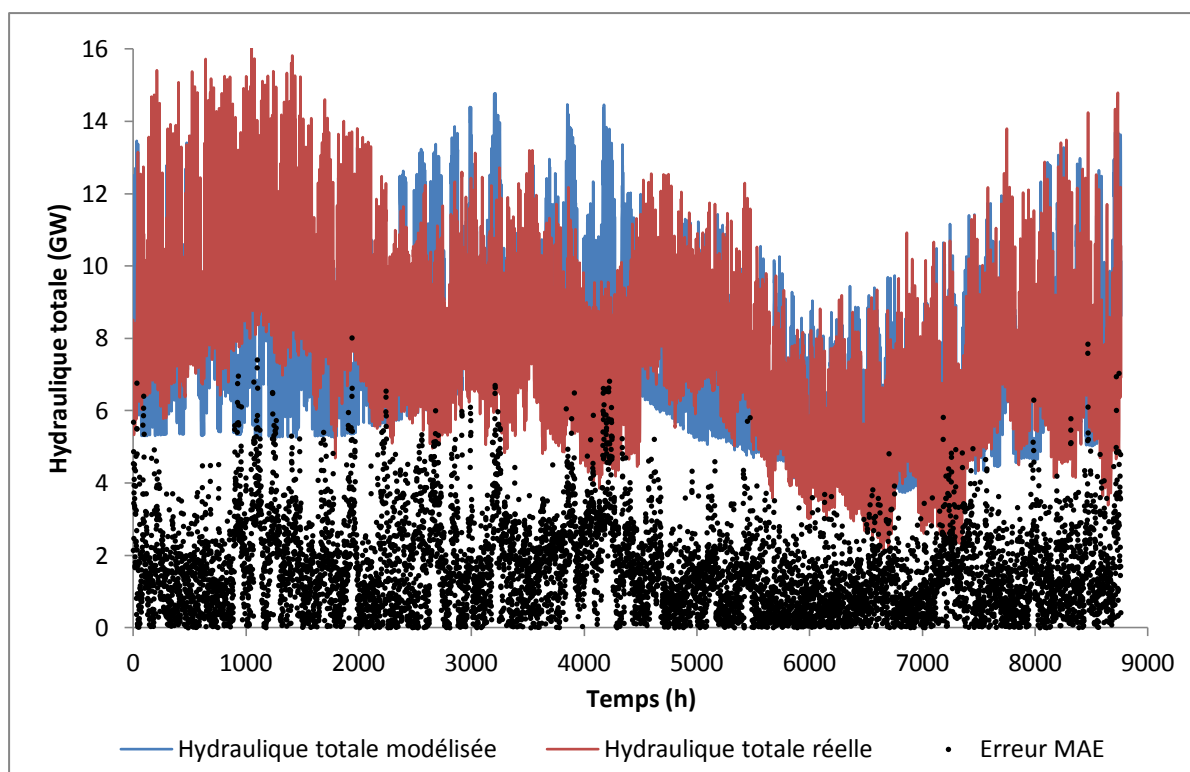


Figure 48 : Modélisation de la production hydraulique 2014

Productions fatales hors hydraulique

La capacité installée en photovoltaïque a évolué au cours de l'année 2014, de 4330 MW à 5300 MW selon les bilans électriques de RTE des années 2013 et 2014. On considère pour cette année une capacité installée de 4800 MW.

Concernant la production décentralisée, représentée sur la figure suivante, on constate comme pour 2013 une association de comportement de base (majoritaire) et de pointe (ponctuel), surtout pour le Fioul. La partie pointe est donc associée aux autres productions de pointe (turbines à combustion). En considérant pour le fonctionnement de base une puissance de 2300 MW en gaz et 500 MW en fioul, le modèle donne les résultats présentés sur la figure suivante. La variation de la production fossile décentralisée est bien représentée, malgré le peu d'informations disponibles concernant ce groupe de technologies. La capacité installée de ce groupe est en baisse, au profit des installations de production renouvelable, à base de biomasse notamment.

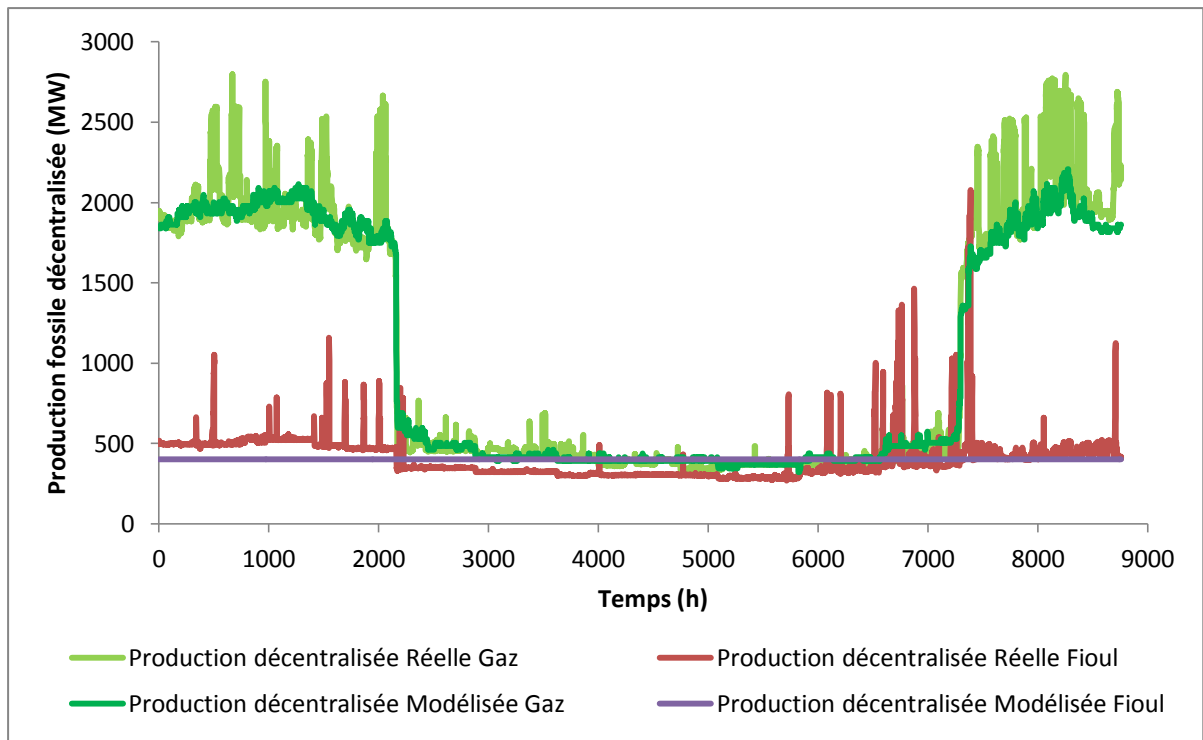


Figure 49 : Production fossile décentralisée, données réelles 2014 (1 janvier - 15 décembre)

La production thermique décentralisée renouvelable et assimilée (biomasse, biogaz et incinération des déchets) a été modélisée pour une capacité installée de 1500 MW en 2014. Plus de 90 % des erreurs sont inférieures à 10 %.

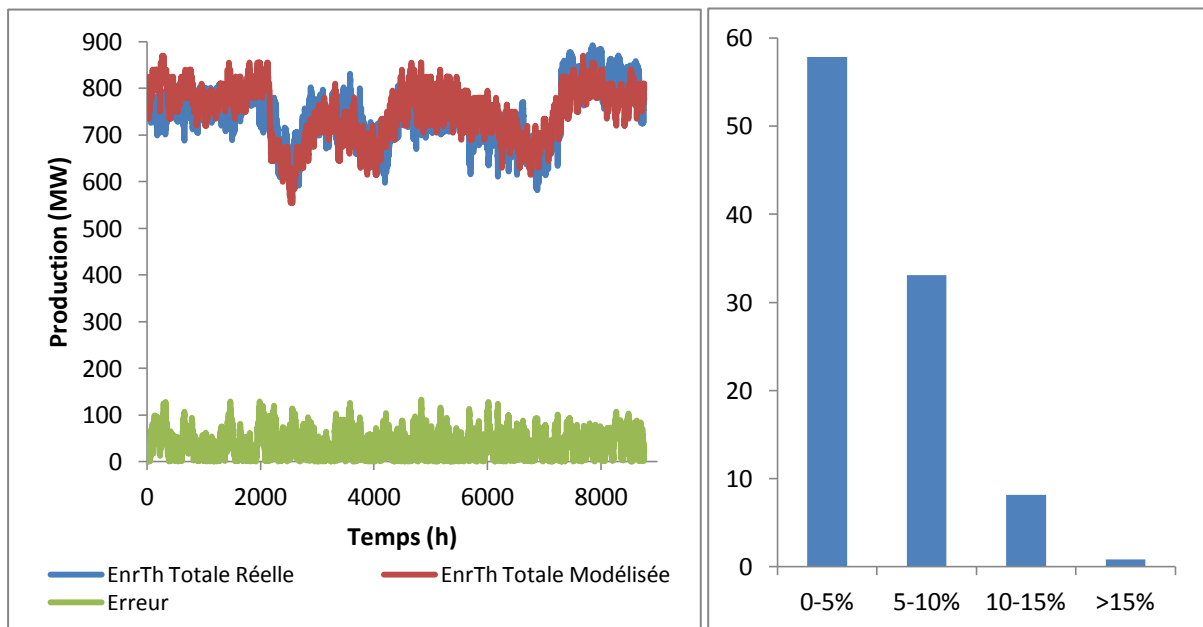


Figure 50 : Production thermique renouvelable décentralisée et erreur de modélisation

Productions modulables hors hydraulique

Tableau 25 : Erreurs sur la production nucléaire, charbon-gaz et pointe, pour l'année 2014

Nom	Abréviation	Nucléaire 2014	Charbon et gaz 2014	Technologies de pointe 2014
Biais	MBE	-6,9 TWh -1,7 %	0,7 TWh 5,1 %	-0,1 TWh (35,7 %)
Erreur moyenne	MAE	2124 MW	1000 MW	26 MW
Erreur relative	MAPE	4,5 %	65,9 %	100 %
Coefficient de corrélation	COR	0,96	0,82	0,59

La transmission des erreurs à travers le modèle engendre des erreurs (MAE, MAPE) relativement importantes sur les productions modulables (Tableau 25). Cependant, les coefficients de corrélation restent hauts sur le nucléaire et les technologies fossiles (>0,8).

L'objectif du modèle étant d'évaluer les impacts des usages de l'électricité dans les bâtiments, les performances du modèle pour l'année 2014 sont testées sur un usage chauffage (maison individuelle), ECS (résidentiel) et électricité spécifique (puissance dissipée RT2012). Le potentiel de réchauffement global par usage et annuel moyen est calculé à partir des données réelles de production de 2014 et à partir des productions générées par le modèle en fonction des données de températures extérieures et de vitesse de vent réelles 2014. Les résultats sont présentés sur la Figure 51.

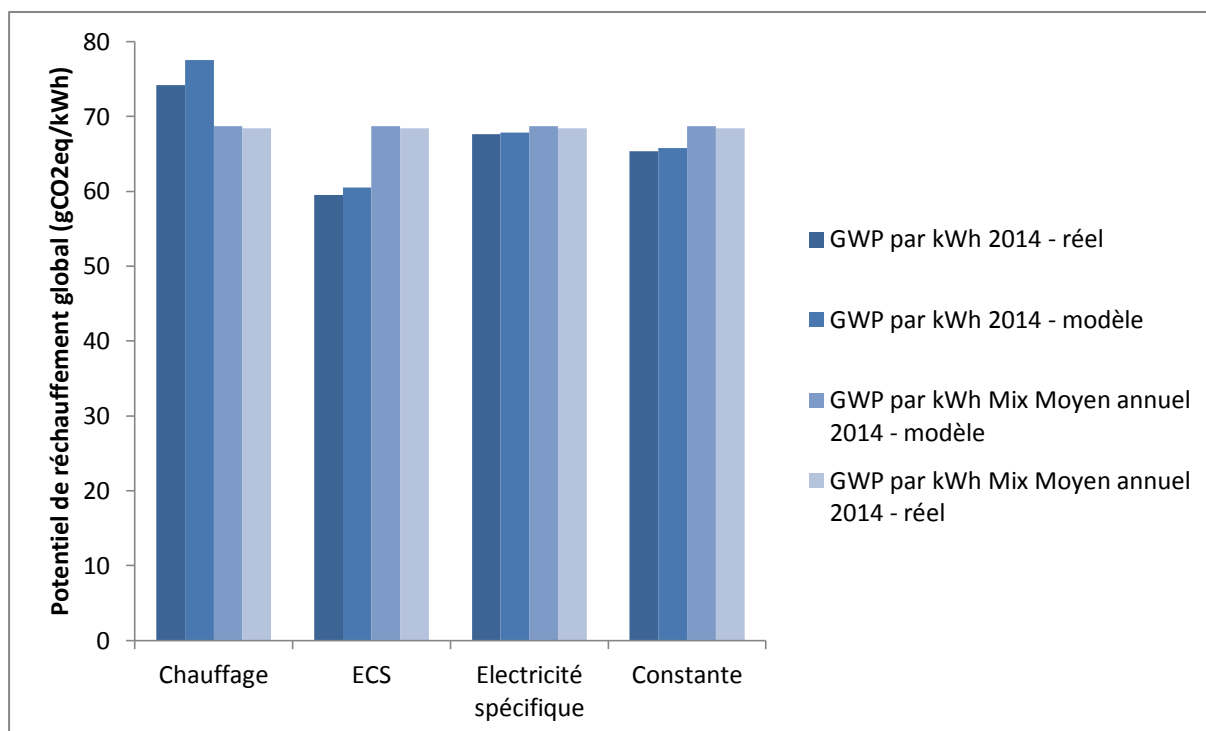


Figure 51 : Potentiel de réchauffement global par usage et moyenne annuelle sur 2014

On constate premièrement que les impacts du mix annuel moyen calculés par le modèle sont très proches de la réalité. Ensuite, le biais sur le chauffage est de 4,5 % contre 7,4 en utilisant le mix annuel moyen calculé par le modèle. Le biais est très faible pour l'ECS et l'électricité spécifique (inférieure à 2 %) alors qu'il monte à plus de 15 % en utilisant le mix annuel moyen.

L'ordre de grandeur des écarts entre mix annuel moyen et mix par usage dépend de façon importante de l'année utilisée. On obtient une différence de 20 % environ pour le chauffage en 2013 contre moins de 10 % en 2014 à cause des températures exceptionnellement chaudes observées en 2014 et de la faible utilisation de charbon. Cependant, on constate que pour l'ensemble des usages, le mix horaire est toujours plus performant que le mix annuel moyen.

2.6. DISCUSSION ET CONCLUSION DU CHAPITRE

Les premiers travaux sur le thème de la modélisation dynamique des impacts de l'électricité, effectués par Herfray, ont été publiés en 2011 (Herfray, 2011a). Ils ont permis de montrer l'importance que pouvaient avoir les aspects dynamiques sur le bilan environnemental d'un bâtiment. L'approche était basée sur une analyse fréquentielle de la production électrique. Seules les données de trois groupes de production étaient alors accessibles : production nucléaire, production thermique fossile (gaz, charbon et fioul) et hydraulique. La publication depuis 2012 par RTE de données beaucoup plus détaillées (9 catégories de production en 2012, 18 en 2013) intégrant en particulier les énergies renouvelables (éolien, solaire, biomasse, biogaz) et la production d'électricité par incinération des déchets ainsi que les énergies thermiques fossiles décentralisées (cogénération fioul et gaz) a permis d'aller plus loin en développant le modèle proposé ici.

Ce modèle donne une représentation du fonctionnement « type » du système électrique actuel. Il est guidé par la demande et réagit à un changement de configuration du système électrique (p. ex. augmentation de la capacité installée éolienne). Ce n'est pas un modèle de prévision de la production, mais un modèle permettant de représenter les variations horaires de la production électrique dans un cadre de référence. Il donne accès à une modélisation horaire ou horaire par usage du mix électrique telle que proposé dans les travaux de G. Herfray, mais il donne également accès à une modélisation marginale à court terme (réaction à une variation de la demande en électricité). Le modèle a été construit pour être en cohérence avec les référentiels climatiques utilisés dans le cadre de la simulation thermique dynamique des bâtiments et des quartiers. Cela permet de rendre compte de phénomènes d'ensemble, comme une vague de froid ou une canicule, qui touchent à la fois le bâtiment simulé et le système électrique et impactent donc de deux façons distinctes et simultanées le bilan environnemental du bâtiment ou du quartier étudié.

Le modèle est proche d'autres modèles existants dans la littérature, comme le modèle EnergyPLAN développé par le professeur Lund (Lund, 2007) ou le modèle de dispatch développé par Raichur et al. (Raichur et al., 2015). Toutefois, contrairement aux deux modèles cités, le modèle développé dans cette thèse modélise explicitement le lien entre les données climatiques, la consommation d'électricité et la production d'électricité (énergie photovoltaïque et éolienne notamment). De plus, le modèle est adapté au contexte français dans lequel le nucléaire tient aujourd'hui une place centrale. Certaines contraintes de production comme les contraintes de réserve (capacité disponible non utilisée mobilisée en cas d'incident) n'ont pas été intégrées explicitement, contrairement à (Raichur et al., 2015). Le modèle est centré sur le système électrique, contrairement au modèle EnergyPLAN qui permet de modéliser l'ensemble d'un système énergétique.

La modélisation proposée dans ce chapitre se veut simple afin d'être facilement intégrée dans le cadre de l'évaluation environnementale des bâtiments et des quartiers. Les simplifications effectuées ainsi qu'un manque de données engendrent des défauts de

précision, notamment concernant la prise en compte de facteurs économiques complexes. C'est le cas notamment concernant la modélisation de la consommation nationale et des exportations.

Les paramètres concernant la sécurité du système électrique ont également été négligés dans cette modélisation car ils supposent une connaissance approfondie des lieux de production et des lignes de transmission. L'approche adoptée considère que le réseau et le parc de production sont dimensionnés de façon à satisfaire la consommation et ne tient donc pas compte d'éventuels problèmes d'insuffisance de production, de saturation locale du réseau ou de risque de black-out sur le système électrique. Certaines centrales, notamment thermiques, peuvent être mises en route pour des raisons de maintenance alors que, d'un point de vue strictement économique, elles ne devraient pas fonctionner. Ce paramètre a également été négligé mais ne représente qu'une part négligeable de la production totale.

La modélisation de l'hydraulique et notamment de la répartition saisonnière des ressources en eau est très simplifiée et repose en partie (hydraulique de lac) sur des données peu détaillées (la production de l'hydraulique de lac seule n'est disponible actuellement que pour 2013 et 2014). Or 2013 est une année particulière, notamment concernant sa pluviométrie largement au-dessus de la moyenne. Davantage de données devraient être disponibles dans les années à venir et permettront d'améliorer cette vision agrégée des ressources en eau.

La disponibilité des centrales thermiques (nucléaire, gaz et charbon) présente une variation saisonnière qui est principalement une conséquence de la baisse de la demande en été. Un autre facteur plus minoritaire joue également : l'accès à une quantité d'eau suffisante pour le refroidissement des centrales thermiques peut être un facteur limitant de la production en été. Dans le modèle, le lien entre la disponibilité des centrales et le niveau de consommation n'est pas modélisé. L'application du modèle à un cadre de prospective où les paramètres influençant la disponibilité seraient fortement modifiés (p. ex. baisse drastique de la thermo-sensibilité de la demande, augmentation importante de la consommation estivale due à une évolution des températures) restera limitée tant que ce lien ne sera pas explicité.

La production éolienne est considérée comme une production fatale. Or les parcs éoliens peuvent moduler leur production (p. ex. ralentissement des pales). Sans combinaison avec un système de pompage, l'électricité non produite est alors perdue. Cependant, dans le cadre d'une augmentation importante des capacités de production renouvelables dépendantes conditions météorologiques, la modulation de ces productions peut être un paramètre important pour le fonctionnement du réseau (Abdelouadoud, 2014).

Il est possible de faire évoluer les capacités installées considérées dans le modèle. Cela permet d'envisager une évolution tendancielle de court ou moyen terme du parc de production d'électricité. Néanmoins, pour avoir une représentation fidèle du fonctionnement du système électrique, les plages de fonctionnement des technologies doivent être contraignantes et sont parfois peu flexibles (fonctionnement du pompage des STEP, entre autres). On considère par exemple une disponibilité des centrales nucléaires basée sur les

disponibilités historiques. Cette disponibilité est beaucoup plus basse en été qu'en hiver, principalement à cause de la différence de niveau de consommation électrique entre les deux saisons. Si cette différence évolue dans le futur, la planification des arrêts de maintenance sera certainement impactée. Ces effets sont des problématiques de long terme qui ne peuvent être intégrées au modèle en l'état. Un modèle de prospective énergétique est utilisé dans le Chapitre 4 afin d'évaluer les limitations d'une étude négligeant les possibles évolutions futures du système électrique.

Le chapitre suivant propose différentes manières d'utiliser le modèle développé afin d'améliorer la précision et le réalisme de l'analyse du cycle de vie des bâtiments et des quartiers.

Chapitre 3. Évaluation des impacts environnementaux – court terme

3.1. INTRODUCTION

Le Chapitre 1 a permis de souligner l'importance d'une amélioration de la prise en compte des interactions entre le système et son arrière-plan, en particulier le système électrique, dans l'analyse du cycle de vie des bâtiments et des quartiers. Cette amélioration peut se faire grâce à une approche conséquente adaptée à un objectif d'écoconception des bâtiments et des quartiers. Le développement de cette approche s'appuie sur l'ACV dynamique et sur l'ACV prospective. Ces deux axes permettent d'améliorer la précision de l'inventaire et peuvent également être utilisés pour améliorer une approche attributionnelle. Un modèle de fonctionnement du système électrique a été développé (Chapitre 2) et permet de schématiser le fonctionnement du système électrique actuel. Il est utilisé comme base dans le Chapitre 1 pour répondre à différentes approches de modélisation horaire des impacts environnementaux générés ou évités par l'utilisation ou la production d'électricité dans les bâtiments et les quartiers.

Différentes approches méthodologiques permettant une prise en compte plus précise de la consommation d'électricité sont proposées dans ce chapitre. En analyse de cycle de vie des bâtiments et des quartiers, la prise en compte des impacts environnementaux de la consommation électrique est le plus souvent effectuée sur la base d'un mix électrique moyen annuel. Ceci revient à négliger :

- la variation de la consommation électrique des bâtiments et des quartiers selon les saisons (chauffage, climatisation), les jours de la semaine (usages professionnels), les heures de la journée (usages professionnels et domestiques) ;
- la variation des éventuelles productions locales d'électricité : le photovoltaïque ne produit qu'en journée, et de façon plus importante en été qu'en hiver, la cogénération produit plus en hiver qu'en été ;
- la variation de la production électrique, conséquence de la variation de la consommation et des caractéristiques du système de production (par exemple, la pointe saisonnière de la consommation entraîne une production d'électricité par les centrales à charbon plus importante en hiver que le reste de l'année) ;
- les contraintes de production existantes (par exemple la saturation de la production hydraulique, ou l'obligation d'utiliser des moyens très réactifs comme les turbines à combustion au moment des pics de consommation d'électricité afin de satisfaire la demande) ;
- les bénéfices environnementaux liés à la mise en place de stratégies d'effacement des pointes ;

- la durée de vie longue des ensembles bâtis et l'évolution dans la durée de paramètres influençant le bilan environnemental tels que les caractéristiques du système électrique (capacités installées, rendement), l'évolution du bâtiment et l'évolution du climat (températures, précipitations).

Après un point sur les inventaires de flux utilisés, deux approches court terme sont développées : une approche attributionnelle dynamique, une approche dite conséquentielle. Ces approches sont implémentées dans un outil d'ACV bâtiment/quartier et testées sur un cas simple à la fin de ce chapitre afin d'en discuter les apports et les limitations. L'application sur un cas simple permet par ailleurs de distinguer approche attributionnelle et conséquentielle sur l'ensemble des contributeurs et pas seulement sur les aspects liés à l'électricité.

3.2. INVENTAIRES D'ÉMISSIONS ET DE RESSOURCES

3.2.1. Introduction

L'évaluation des impacts générés par la consommation d'électricité ou évités par une production locale d'électricité doit tenir compte de l'ensemble des étapes du cycle de vie de la production électrique. Elle intègre l'extraction des matières premières nécessaires au fonctionnement des centrales mais aussi la construction des centrales et les réseaux électriques de transport (haute tension) et de distribution (basse et moyenne tension). Les impacts générés par kWh délivré sur le réseau basse tension et produit par une technologie « tech » sont représentés par l'équation suivante :

$$I_i = C_f \times (ICV_i \times (1 + l_i) + ICV_{net}(i)) \quad 3-1$$

Où C_f représente le vecteur des facteurs de caractérisation de l'impact calculé, ICV_i l'inventaire de cycle de vie de la technologie i de production d'électricité (voir paragraphe 3.2.3), et ICV_{net} l'inventaire des infrastructures réseau, variable en fonction de la technologie considérée (voir paragraphe 3.2.2). Par exemple, le photovoltaïque est supposé fournir l'électricité produite sur le réseau basse tension, donc avec des impacts liés aux infrastructures réseau moindres que l'éolien, qui fournit sa production principalement sur le réseau haute tension. l_i représente le niveau de perte en ligne de la technologie considérée.

L'inventaire des émissions de polluants et des consommations de ressources générées par la production d'un kWh fourni sur le réseau basse tension inclut donc les différentes composantes présentées sur le schéma ci-dessous : infrastructures des réseaux haute, moyenne et basse tension, émissions liées à l'utilisation du réseau (SF6 notamment), pertes en ligne, émissions dues au fonctionnement des technologies de production électrique, consommation de ressources liées aux combustibles et à la fabrication des centrales de production.

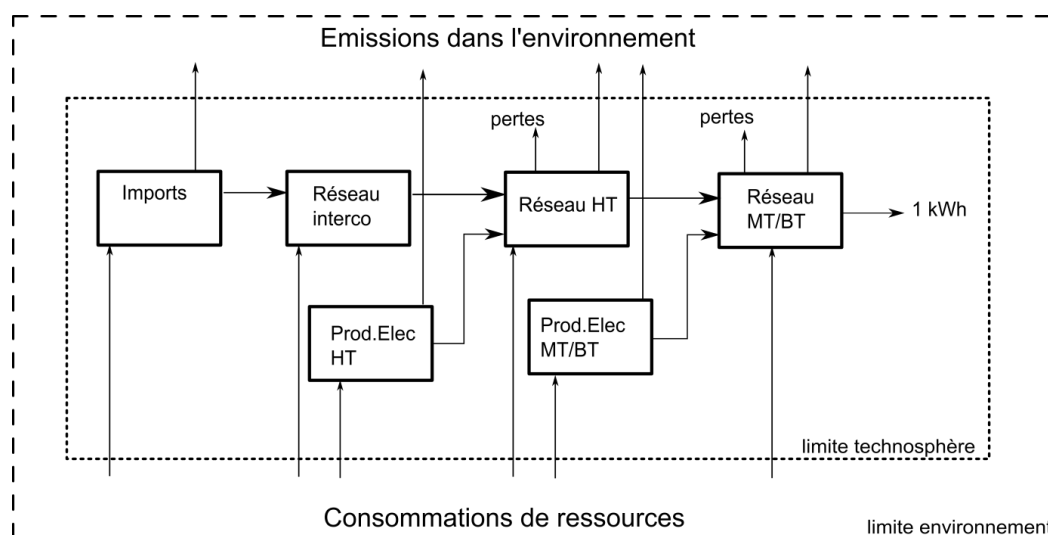


Figure 52 : Diagramme du procédé de production d'un kWh délivré sur le réseau basse tension (BT)

L'inventaire de flux est effectué à partir des données génériques issues de la base de données ecoinvent V3.1 (Frischknecht et Rebitzer, 2005 ; Frischknecht et al., 2007 ; ecoinvent, 2010). Sa dernière version récemment publiée inclut plus de 4000 produits et procédés et recense plus de 1700 flux de polluants ou de consommations de ressources. Elle tient également compte des interactions entre les secteurs économiques par inversion matricielle (Jolliet et al., 2010). Concernant la production d'électricité, un grand nombre de procédés sont disponibles, dont 26 spécifiques à la France (Treyer et Bauer, 2014).

Les paragraphes suivants reviennent sur les choix de procédés et les ajustements qui ont été effectués pour évaluer l'inventaire des technologies de production d'électricité ainsi que l'inventaire du réseau électrique.

3.2.2. Inventaire du réseau électrique

Suivant les informations issues de la base ecoinvent v3, les recommandations de Itten et al. (Itten et al., 2012) et les informations sur les pertes en ligne diffusées par RTE⁵⁵ et ERDF⁵⁶, les différentes composantes du réseau électrique sont modélisées comme suit :

⁵⁵ RTE - Portail clients : http://clients.rte-france.com/lang/fr/visiteurs/vie/vie_perte_RPT.jsp Le réseau HT de RTE correspond au réseau HT+MT de ecoinvent

⁵⁶ ERDF : http://www.erdf.fr/Compensation_des_pertes, accédé en juillet 2015

- Pour un kWh fourni sur le réseau haute tension (HT), on compte 6,58E-9 km de lignes HT et 3,17E-10 km de réseau longue distance (représentant les lignes à haute tension permettant les échanges avec les pays frontaliers). Ces chiffres sont obtenus en rapportant l'ensemble des kWh sortant du réseau HT au nombre de km de lignes HT. Le pourcentage de pertes en ligne est fixé à 3 %. Le fonctionnement du réseau génère une émission de 5E-6 kg de protoxyde d'azote (N₂O) et 4,16E-6 kg d'ozone dans l'air pour la transmission et la fourniture de 1 kWh sur une distance correspondant à une distance moyenne entre les centrales de production et les postes de transformation MT.
- Pour un kWh fourni sur le réseau moyenne tension (MT), on compte 1,86E-8 km de lignes MT. Les pertes en ligne sont comptabilisées au niveau basse tension, étant données les informations disponibles. Le fonctionnement du réseau nécessite l'utilisation 5.4E-8 kg de d'hexafluorure de soufre (SF₆), produit et émis dans l'air, pour la transmission de 1 kWh injecté sur le réseau MT et transmis au transformateur BT.
- Pour un kWh fourni sur le réseau basse tension (BT), on compte 8,74E-8 km de lignes BT. Le pourcentage de pertes en lignes est fixé à 6 % (pertes non techniques incluses). Le fonctionnement du réseau nécessite l'utilisation 4,03E-10 kg de d'hexafluorure de soufre (SF₆), produit puis émis dans l'air, pour la transmission de 1 kWh, de l'injection sur le réseau BT à la fourniture au client final.

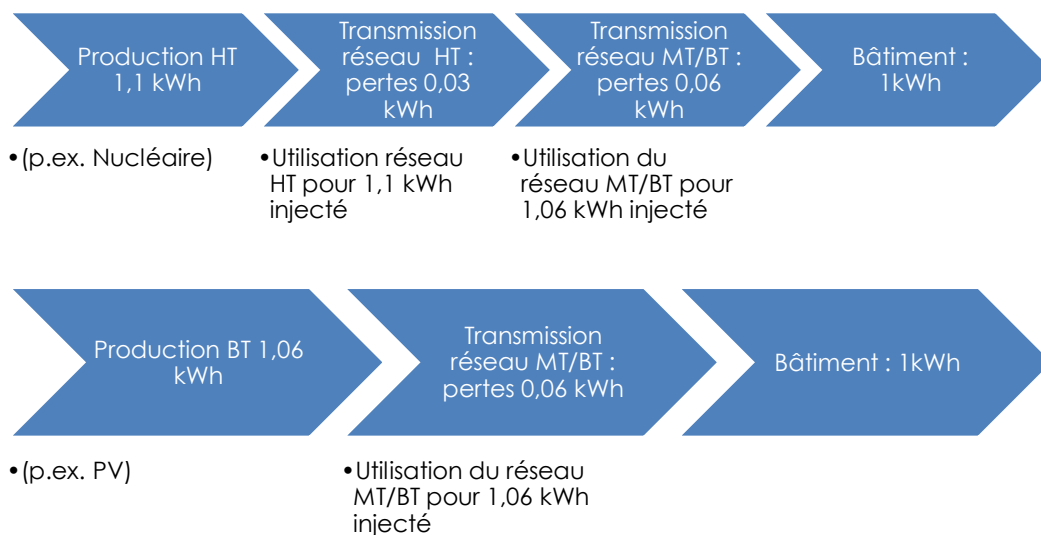


Figure 53 : Fourniture d'un kWh sur le réseau BT par une technologie reliée au réseau HT (haut) ou BT (bas)

Ainsi, à l'inventaire d'un kWh fourni sur le réseau BT (auquel sont reliés les bâtiments et les quartiers) par une technologie produisant sur le réseau HT (voir Figure 53), on ajoute un inventaire lié à l'utilisation du réseau BT et MT (pour 1,064

kWh) et un inventaire lié à l'utilisation du réseau HT (pour 1,1 kWh). On comptabilise également au niveau de la production même, 1,1 kWh produit (soit 9 % de pertes en ligne) pour 1 kWh fourni. Pour une production injectée sur le réseau moyenne tension et fournie sur le BT, comme c'est généralement le cas des unités que l'on appelle « thermiques décentralisées » (cogénération gaz et fioul, incinérateur de déchets, biogaz et biomasse), on compte 6 % de pertes de production, l'utilisation du réseau MT et du réseau BT (voir Figure 53). Pour une production injectée directement sur le réseau basse tension et fournie sur le même réseau, comme c'est le cas pour la majorité des installations photovoltaïques, on ajoutera seulement des pertes de 6 % et une fraction du réseau BT.

3.2.3. Inventaire des technologies productrices d'électricité

Les 14 technologies de production d'électricité considérées dans le modèle du chapitre 2 sont listées dans le Tableau 26 Leur inventaire de cycle de vie a été modélisé à partir des procédés disponibles dans la base de données ecoinvent v3.

Tableau 26 : Technologies de production d'électricité et abréviations

Technologie de production d'électricité	Abréviation dans les tables et figures
Energies renouvelables et de récupération thermiques (IUOM/biomasse/biogaz)	F_EnrTh
Centrales Gaz (CCG) et Charbon centralisées	M_GazCharbon
Cogénération gaz	F_CogéGaz
Cogénération fioul	F_CogéFioul
Eoliennes	F_Eolien
Modules Photovoltaïques	F_Solaire
Hydraulique au fil de l'eau	F_HydroFil
Centrales nucléaires	M_Nucléaire
Hydraulique de lac (Grands barrages)	M_Hydrolac
Stations de transfert par pompage (STEP)	M_STEP
Hydraulique éclusée (petits barrages)	M_éclusée
Centrales de pointe (Fioul)	M_FioulTAC
Importations	M_Import

Parmi les différents inventaires, des choix ont dû être faits pour se rapprocher au mieux de la réalité du contexte français, notamment :

- La cogénération au gaz est approximée par un inventaire européen d'installations de 1 MW, or beaucoup d'installations en France ont une puissance supérieure à 12 MW.
- La cogénération au fioul est représentée par un inventaire de cogénération au diesel de 200 kWe. Ce choix s'appuie sur la modélisation du mix français dans la base ecoinvent (Itten et al., 2012).
- Les centrales au gaz françaises sont évaluées à partir d'inventaires sur les centrales au gaz à cycle combiné « reste du monde ». L'inventaire pour les centrales au gaz françaises correspond à une technologie conventionnelle aujourd'hui obsolète. L'ensemble des centrales au gaz en France métropolitaine sont aujourd'hui à cycle combiné.
- L'inventaire de la production hydraulique de barrage est utilisé pour représenter les stations de transfert par pompage. Ce choix est fait afin de dissocier les émissions dues aux infrastructures de production (fabrication, maintenance des barrages) et les émissions dues à la consommation d'électricité des STEP. Ce choix est expliqué en détail dans la partie 3.3.3 de ce chapitre, sur l'approche attributionnelle dynamique.
- Il n'existe pas de procédé satisfaisant pour l'évaluation des turbines à combustion qui fonctionnent principalement au fioul en France. L'inventaire correspondant à la production des centrales au fioul est utilisé. Cependant, cet inventaire correspond à des centrales thermiques à flamme, et non à des turbines à combustion. Elles sont peu réactives. Au contraire, les turbines à combustion fonctionnent sur le principe du moteur à réaction et sont très réactives.
- Les productions centralisées de gaz (cycle combiné) et de charbon sont groupées dans le modèle de simulation de la production d'électricité. Ces technologies sont donc également groupées pour l'analyse environnementale. La répartition entre gaz et charbon est basée sur la répartition historique moyenne des années 2011 à 2015, soit 56,6 % de charbon et 43,4 % de gaz (cycles combinés seulement). Une variation importante est observée selon les années, en fonction des prix des différents combustibles sur les marchés mondiaux de l'énergie : le charbon a produit 70 % du total de ce groupe en 2013 contre seulement 43 % en 2011 et 2015, selon les données diffusées par RTE dans les bilans prévisionnels de l'équilibre offre-demande⁵⁷.

⁵⁷ Disponibles sur <http://www.rte-france.com/fr/article/bilan-previsionnel>

3.2.4. **Évaluation de l'impact environnemental par kWh fourni sur le réseau BT**

Après avoir établi l'inventaire de cycle de vie pour chacune des approches, il faut agréger les différents flux recensés sous la forme d'indicateurs environnementaux afin que ceux-ci puissent être interprétés.

Suite à la présentation des indicateurs environnementaux utilisés pour l'évaluation des bâtiments et des quartiers dans le Chapitre 1 (paragraphe 1.1.4), les douze indicateurs environnementaux considérés pour l'analyse environnementale sont listés dans le Tableau 27.

Tableau 27 : Liste des indicateurs environnementaux évalués

Indicateurs	Unité	Reference
Énergie Primaire (CED)	GJ	(Frischknecht et al., 2007)
Consommation d'eau (Water)	m3	(Frischknecht et al., 2007)
Épuisement des ressources abiotiques (ADP)	kg Sb-eq	(Jeroen B. Guinee, 2002)
Déchets non radioactifs (Waste)	t eq	(Frischknecht et al., 2007)
Déchets radioactifs (Rad)	dm3	(Frischknecht et al., 2007)
Effet de serre (100 ans) (GWP)	t CO2 eq	(Solomon, 2007)
Acidification (AP)	kg SO2 eq	(Jeroen B. Guinee, 2002)
Eutrophisation (EP)	kg PO43- eq	(Jeroen B. Guinee, 2002)
Dommages à la biodiversité(Bio)	PDF.m ² .yr	(Goedkoop et Spriensma, 2001)
Dommages à la santé humaine (DALY)	DALY	(Goedkoop et Spriensma, 2001)
Ozone photochimique (smog) (POP)	kg C2H4 eq	(Jeroen B. Guinee, 2002)
Odeur (Odor)	Mm3	(Jeroen B. Guinee, 2002)

À partir des données d'inventaire mentionnées dans les paragraphes précédents, différentes technologies de production d'électricité utilisées en France ont été comparées sur la base de ces indicateurs environnementaux. La comparaison des différentes technologies sur les indicateurs de potentiel de réchauffement global, de consommation d'eau et de génération de déchets radioactifs est présentée sur les Figure 54 à Figure 56.

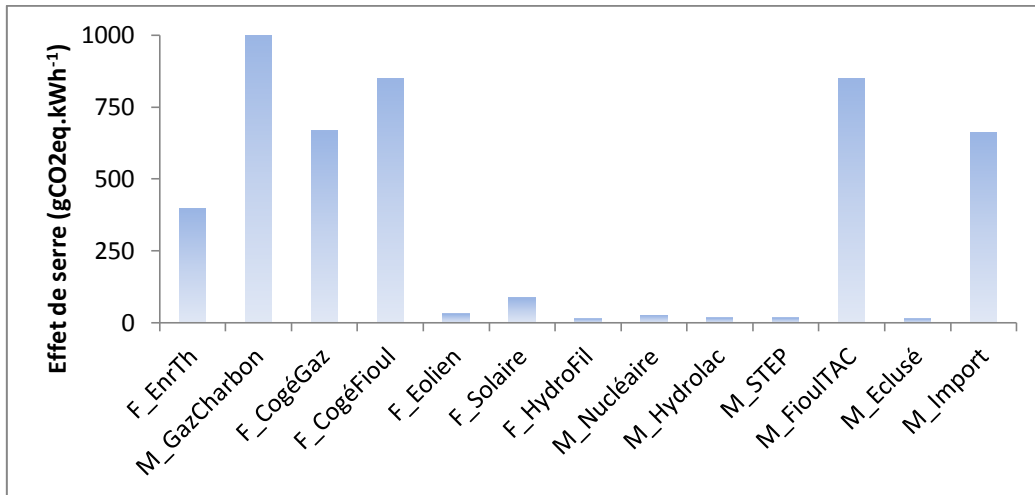


Figure 54 : Potentiel de réchauffement global par kWh par technologie

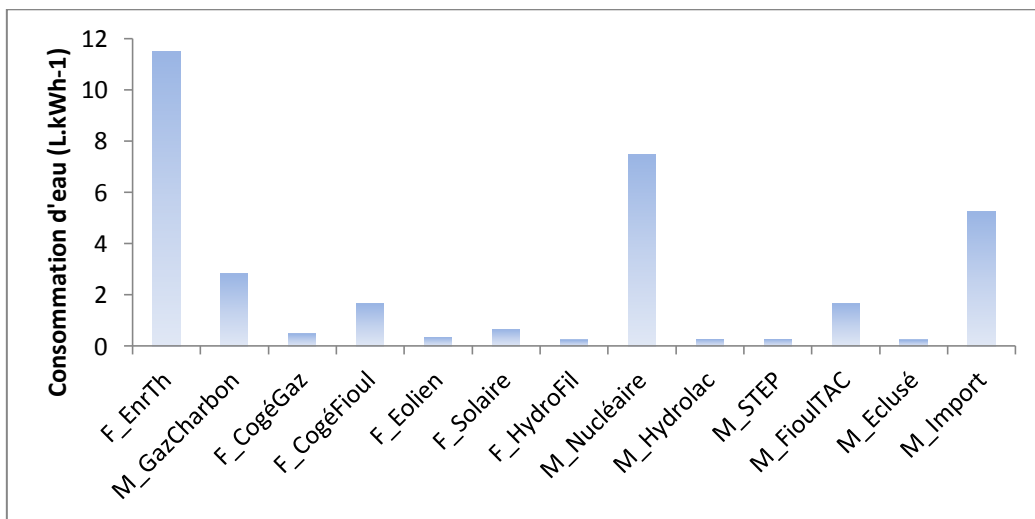


Figure 55 : Consommation d'eau par kWh par technologie

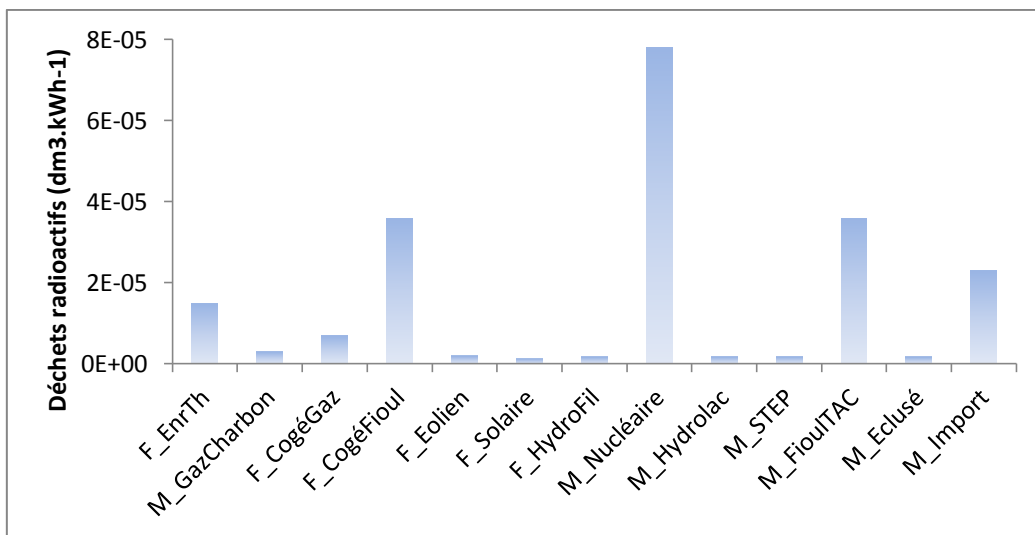


Figure 56 : Déchets radioactifs par kWh par technologie

Alors que la production d'électricité à partir de biogaz (intégrée dans F_EnrTh) consomme d'importantes ressources en eau⁵⁸, la contribution du nucléaire est centrée sur la production de déchets radioactifs. Les centrales thermiques à combustibles fossiles (charbon, fioul, gaz) pèsent particulièrement sur le climat, l'acidification terrestre et l'épuisement des ressources abiotiques (voir aussi Annexe J). Les importations ont une contribution importante sur l'eutrophisation aquatique (Annexe J), due à la part importante d'électricité à base de lignite, venant d'Allemagne.

La génération de déchets radioactifs par les centrales au fioul provient de l'étape d'extraction du pétrole durant laquelle une quantité importante de déchets radioactifs de faible radioactivité est générée.

Ceci illustre l'importance d'une évaluation multicritère de l'électricité consommée et produite par les bâtiments et les quartiers. La focalisation sur un indicateur unique risquerait d'engendrer le déplacement d'un problème environnemental vers un autre.

3.2.5. Consommation et production d'électricité des ensembles bâtis

La prise en compte de la variation temporelle du mix de production et des impacts environnementaux associés nécessite l'utilisation de données horaires de consommation d'électricité du système étudié (bâtiment ou quartier). Ces données peuvent être issues de la simulation énergétique dynamique des bâtiments pour les besoins de chauffage et de climatisation (Peuportier and Sommereux Blanc 1990), d'éclairage, d'eau chaude sanitaire (si elle est produite par un système électrique), et pour la production d'électricité photovoltaïque (Guiavarch et Peuportier, 2006). Elles peuvent provenir de scénarios conventionnels ou de modèles stochastiques (Vorger et al., 2014) pour la consommation d'électricité spécifique.

Le modèle du fonctionnement du système électrique a été construit pour être en cohérence avec les données climatiques utilisées dans les outils de simulation thermique dynamique.

⁵⁸ Ceci est lié à la version de la base de données ecoinvent utilisée (v3), dans laquelle le système des allocations a été complètement révisé par rapport aux versions antérieures. La consommation d'eau importante pour le biogaz provient des procédés d'irrigation utilisés en agriculture, en amont. Le biogaz ayant une valeur économique, il n'est plus considéré comme un déchet mais comme un co-produit de l'agriculture. Une partie des impacts liés aux activités agricoles lui sont donc imputés. Ce nouveau système d'allocation fait passer l'indicateur de consommation d'eau pour la production d'un kWh de biogaz à 24,2 L contre 0,9 L dans la version v2.2.

Concernant le cas d'un projet avec production locale d'électricité (photovoltaïque ou cogénération par exemple), un bilan horaire est effectué afin d'évaluer la part d'électricité autoconsommée, la part d'électricité exportée vers le réseau et la part de l'électricité venant du réseau pour couvrir les besoins résiduels en électricité. La consommation nette en électricité C_{bat} et la production exportée PLE_{exp} sont définies à chaque heure de l'année à partir de la somme des consommations électriques C_{brut} et de la somme de la production locale d'énergie PLE :

$$C_{bat} = \text{Max} (C_{brut} - PLE ; 0) \quad 3-2$$

$$PLE_{exp} = \text{Max} (PLE - C_{brut} ; 0) \quad 3-3$$

On considère que 94,3 % (5,7 % de pertes en lignes sur le réseau basse tension) de l'électricité exportée est transmise efficacement par le réseau et peut être comptabilisée dans les impacts évités.

Les éventuels problèmes d'injection sur le réseau liés à l'intermittence et au caractère fatal (non-modulable) des productions photovoltaïques ou éoliennes sont négligés. En effet, leurs contributions maximales dans le mix horaire reste faible (6,4 % et 13 % en 2013, respectivement pour le photovoltaïque et l'éolien). Pour les territoires isolés, sujets aux problèmes de stabilisation du réseau, moins résilients du fait de leur absence d'interconnexion, une règle experte française recommande une contribution maximale des énergies intermittentes de 30 % (Drouineau et al., 2014). La France avec son large réseau électrique connecté à six de ses voisins est encore en dessous de cette limite. De plus, de récents travaux ont montré qu'elle pouvait être largement repoussée (Bouckaert et al., 2013). De nouveaux moyens de stockage d'électricité ainsi qu'un développement des offres d'effacement au sein d'un réseau intelligent rendent même possible un mix à 100 % d'électricité renouvelable, dont une large majorité provenant de sources intermittentes (Abdelouadoud, 2014).

3.3. APPROCHE ATTRIBUTIONNELLE DYNAMIQUE

3.3.1. Objectifs de la méthode

L'objectif de la méthode est de mieux prendre en compte la variation de la production d'électricité en utilisant des données horaires de production plutôt que des données moyennes annuelles. Ceci permet de prendre en compte la saisonnalité de la production électrique (thermo-sensibilité hivernale et estivale), la variation entre les jours de semaine et le week-end, et la variation au cours d'une journée (heures creuses, heures pleines).

3.3.2. Méthodologie générale

A partir d'une année climatique « type » et des caractéristiques actuelles du système électrique (cf Chapitre 2), le modèle de production électrique permet de définir, heure par heure, un mix de production d'électricité « type ». Ce mix est composé de différentes technologies pour lesquelles les données d'inventaires de cycle de vie par kWh fourni sur le réseau basse tension sont obtenues grâce à la base de données ecoinvent v3, comme décrit dans les paragraphes précédents. Les données concernant le réseau électrique sont également incluses dans l'inventaire de chaque technologie I_i . La somme des impacts de chaque technologie i au prorata de sa contribution donne un inventaire par kWh, I_{hourly} , pour chaque heure de l'année :

$$I_{hourly}(h) = \sum_i \left(I_i \times \frac{P_i(h)}{\sum_i P_i(h)} \right) + I_{step/kWh}(h) \quad 3-4$$

Où $P_i(h)$ est la production de la technologie i à l'heure h et I_i est le vecteur d'impacts de la technologie i par kWh fourni, évalué selon l'équation 3-1. Il faut de plus prendre en compte un impact par kWh lié à la consommation des STEP $I_{step/kWh}(h)$ dont le calcul est expliqué dans le paragraphe 3.3.3.

Le système étudié, bâtiment ou quartier, peut être à la fois producteur et consommateur d'électricité. Les impacts alloués au bâtiment ou quartier étudié I_{bat} sont calculés en faisant la différence entre les impacts liés à la consommation nette du bâtiment C_{bat} et les impacts évités dus à la production exportée vers le réseau PLE_{exp} (voir paragraphe 3.2.5) :

$$I_{bat} = \left(\sum_{h=1}^{8760} I_{hourly} \times C_{bat} \right) - \left(\sum_{h=1}^{8760} I_{hourly} \times PLE_{Exp} \times l_{PLE_{exp}} \right) \quad 3-5$$

Les impacts liés à la consommation sont calculés en multipliant la consommation nette C_{bat} par les impacts par kWh calculés précédemment I_{hourly} . La production d'électricité PLE_{exp} exportée est considérée comme consommée sur le réseau basse tension. On fait donc l'hypothèse qu'elle subit des pertes en ligne équivalentes aux pertes sur le réseau basse tension, soit 6%. $l_{PLE_{exp}}$ représente la part de la production exportée effectivement utilisée par le réseau en intégrant les pertes en ligne, soit 94%. La production exportée est ainsi évaluée comme si elle remplaçait une production du réseau dont les impacts sont représentés par I_{hourly} , ce qui engendre un bénéfice au niveau du bilan environnemental.

Les impacts liés à la fabrication, au transport à l'installation et au traitement en fin de vie du système photovoltaïque appartenant au bâti sont inclus dans les phases de construction, de rénovation et de démolition du bâtiment, et ne sont donc pas mentionnés spécifiquement ici.

La méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux selon l'approche attributionnelle dynamique est résumée dans la Figure 57. A partir d'une demande nationale « type » en électricité (C_{FR}) imposée au système de production d'électricité⁵⁹, la production électrique technologie par technologie est déterminée pour chaque heure de l'année (P_{FR}) pour l'ensemble de la France, grâce au modèle décrit dans le Chapitre 2. Les impacts environnementaux de cette production sont évalués et ramenés à un impact par kWh consommé (I_{FR}). Les impacts (I_{bat}) attribués à la consommation nette du bâtiment (C_{bat}) moins la production locale d'énergie exportée $l_{PLE_{exp}} \times PLE_{exp}$ sont ensuite évalués par multiplication matricielle.

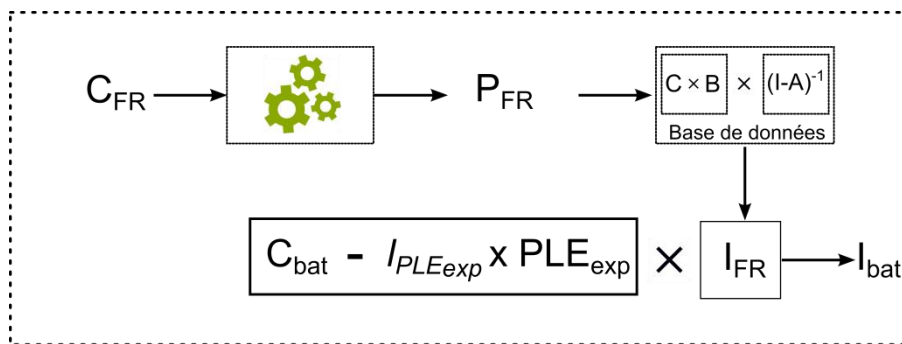


Figure 57 : Méthodologie de l'approche attributionnelle dynamique

⁵⁹ Le calcul de cette consommation nationale « type » a été défini au chapitre 2, paragraphe 2.3.1

Le fait d'évaluer les impacts évités avec le mix attributionnel dynamique est une prise de position qui peut engendrer des incohérences. Ce positionnement sera discuté dans le paragraphe 3.3.5.

3.3.3. Cas particulier des stations de transfert par pompage (STEP)

Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) consomment de l'électricité aux heures creuses pour la turbiner aux heures de pointe, avec un ratio énergie consommée sur énergie produite de 80 % environ⁶⁰ (Brown et al., 2008 ; Kandil et al., 1990)). L'inventaire de cycle de vie spécifique aux stations de transfert par pompage disponible dans la base de donnée ecoinvent v3 tient compte de cette électricité produite, et utilise pour la modéliser un mix annuel moyen français. Ceci pose plusieurs problèmes :

- Le mix moyen utilisé est une moyenne de l'année 2008, qui ne correspond donc pas à une année type et n'est pas en cohérence avec notre cadre d'étude des bâtiments. Par exemple, la contribution de l'électricité éolienne sera sous-estimée, cette production étant quasi inexistante en 2008.
- C'est une moyenne annuelle, qui ne tient pas compte des variations temporelles de la production électrique.

L'impact d'une consommation satisfaite grâce au turbinage des STEP (quand elle déstocke de l'énergie) doit être calculé à partir du moment où la STEP a consommé de l'électricité (quand elle a stocké de l'énergie). Les impacts environnementaux sont premièrement évalués en négligeant la consommation d'électricité des STEP (celle-ci est intégrée dans la demande totale en électricité mais aucun inventaire de consommation d'électricité n'est associé à la production des STEP). Les impacts associés à la consommation d'électricité des STEP (aux heures de pompage) sont ensuite évalués, soustraits des impacts totaux, moyennés par semaine puis affectés aux heures de production des STEP. Le principe est résumé dans les schémas de la Figure 58, la formulation mathématique est ensuite détaillée.

⁶⁰

<http://chercheurs.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Innovation/Publications/technodevoilee/UTDstepWeb.pdf> , (accédé en juin 2015)

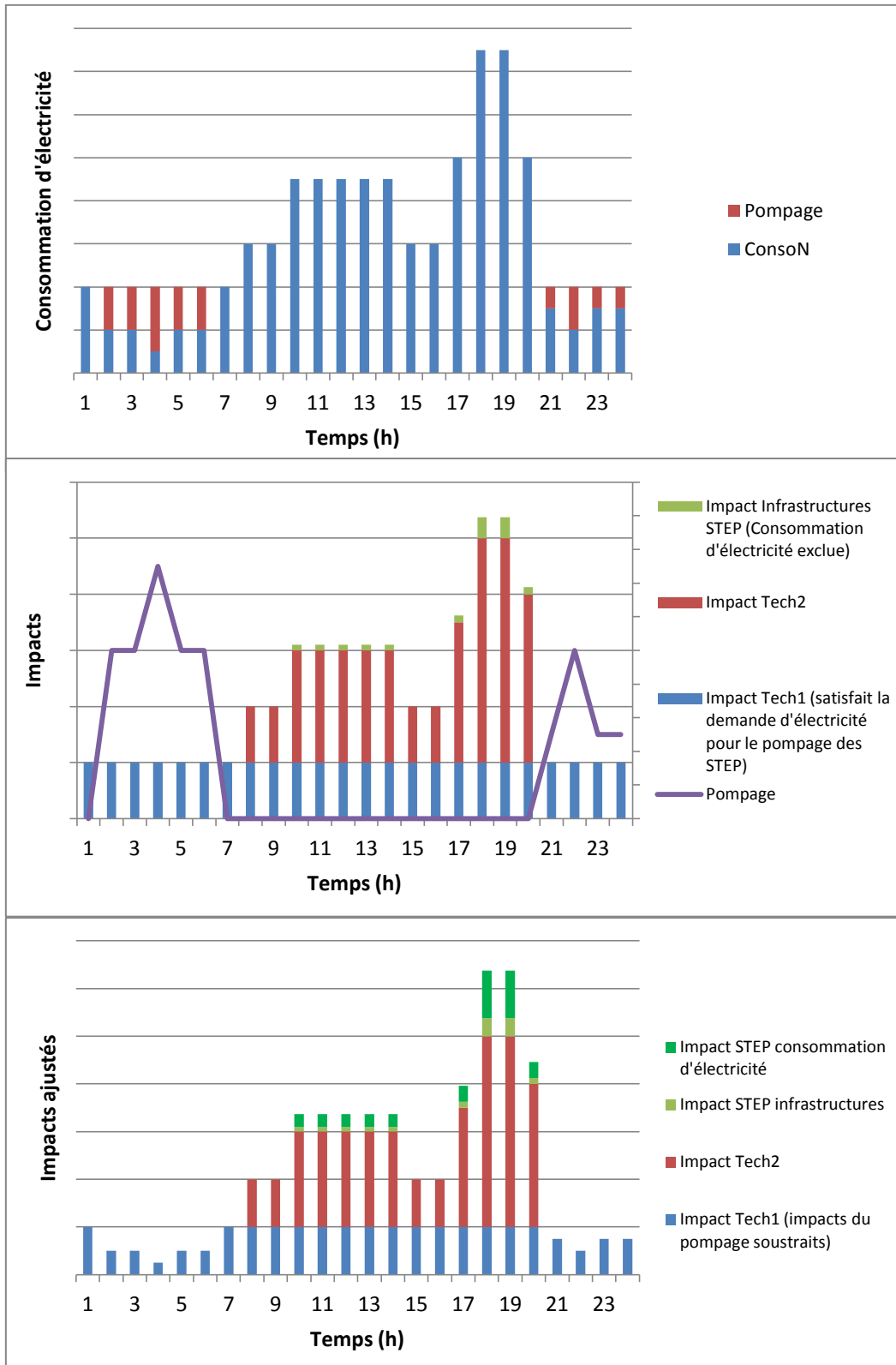


Figure 58 : Schématisation de l'allocation de l'impact lié aux STEP

La procédure d'allocation suivante a donc été développée pour les STEP :

1. Une première évaluation des impacts de la production d'électricité $I_{wo}(h)$ est faite à chaque heure, en négligeant l'impact de la consommation en électricité des STEP. La production des STEP est alors assimilée à l'hydraulique de lac.

$$I_{wo}(h) = \sum_i I_i(h) \times P_i(h) \quad 3-6$$

2. Les impacts dus à la consommation d'électricité des stations de pompage à chaque heure $I_{pump}(h)$ sont ensuite évalués. Ces impacts sont égaux aux impacts à l'heure h , $I_{wo}(h)$, divisés par la production totale à l'heure h et multipliés par la consommation du pompage à l'heure h .

$$I_{pump}(h) = C_{pump}(h) \times \frac{I_{wo}(h)}{C_{FR}} \quad 3-7$$

3. Pour chaque semaine, on considère que l'électricité est produite grâce à l'eau pompée la semaine précédente. Pour les impacts de la semaine w , on fait donc la somme des impacts $I_{pump}(h)$ sur la semaine $w-1$ que l'on divise par la somme de la consommation électrique des STEP pour se ramener à un impact par kWh consommé. L'impact de la production des STEP à l'heure h' , $I_{turb}(h' \in w)$ est l'impact moyen de la semaine multiplié par la production des STEP à l'heure h' divisé par le ratio de conversion R entre consommation et production (efficacité des stations). R est une constante fixée à 0,8, d'après les valeurs données par EDF (EDF, 2015) et celles de la littérature (Brown et al., 2008 ; Kandil et al., 1990).

$$I_{turb}(h' \in w) = \frac{\sum_{h \in (w-1)} I_{pump}(h)}{\sum_{h \in (w-1)} C_{pump}(h)} \times \frac{P_{turb}(h')}{R} \quad 3-8$$

4. Enfin, l'impact total des STEP à l'heure h' est égal à l'impact du turbinage, $I_{turb}(h')$, si les STEP produisent de l'électricité à cette heure et à l'opposé de l'impact du pompage, $I_{pump}(h')$, si elles en consomment. La modélisation développée au Chapitre 2 n'interdit pas une consommation et production simultanées des STEP, on écrit donc :

$$I_{step}(h') = I_{turb}(h') - I_{pump}(h') \quad 3-9$$

On divise ensuite par la production totale pour avoir un impact STEP par kWh fourni :

$$I_{step/kWh}(h') = \frac{I_{turb}(h') - I_{pump}(h')}{\sum_i P_i(h')} \quad 3-10$$

Cette méthode affecte bien les impacts dus à la consommation d'électricité des STEP aux consommations ayant lieu aux heures durant lesquelles les STEP produisent de l'électricité. L'impact dû à la production d'électricité des STEP est évalué en utilisant le modèle de mix électrique afin de tenir compte des variations temporelles de la production d'électricité.

3.3.4. Variation des impacts au cours de l'année

Le Tableau 28 donne pour chaque indicateur calculé, dans le cas d'une année type (année climatique type et système électrique actuel) :

- la valeur moyenne annuelle de l'indicateur par kWh (valeur équivalente au mix moyen) ;
- les valeurs minimales et maximales obtenues sur l'année ;
- l'écart-type relatif (écart-type divisé par la valeur moyenne), exprimé en pourcentage.

Ces valeurs permettent d'apprécier la variation des différents indicateurs environnementaux au cours de l'année en conséquence des variations de la production. On constate que certains impacts sont peu affectés par les variations de mix : leur écart-type relatif reste inférieur ou égal à 5 %. Il s'agit de la demande cumulative en énergie (énergie primaire), la génération de déchets radioactifs et la consommation d'eau. Ces indicateurs sont principalement liés à la production d'électricité d'origine nucléaire⁶¹. La proportion de nucléaire dans le mix varie peu en valeur relative : de 74 % à 78 % selon les mois de l'année (cf. Chapitre 2). A l'inverse, les indicateurs concernant l'acidification, l'effet de serre, l'épuisement des ressources ou encore la production d'ozone photochimique varient de façon importante sur l'année : leur écart-type relatif est supérieur à 30 %. Ces indicateurs sont caractéristiques de la contribution des énergies fossiles (gaz, charbon, fioul, diesel). Concernant l'indicateur d'épuisement des ressources, l'écart-type relatif élevé est dû à la prédominance écrasante des hydrocarbures, liée entre autre à une sur-évaluation des réserves ultimes en uranium dans la méthode CML (Peuportier et al., 2013). De récents travaux considèrent que l'épuisement des ressources en uranium est du même ordre de grandeur que celui des hydrocarbures (Dittmar, 2013).

⁶¹ La consommation d'énergie primaire concerne également les autres centrales thermiques gaz, charbon et fioul.

Tableau 28 : Variation des impacts par kWh fourni

Impact	unité	Mix annuel moyen	Min	Max	Ecart-type relatif (%)*
Acidification (AP)	kg SO ₂ eq	5,0E-04	2,5E-04	1,0E-03	31
Dommages à la biodiversité (Bio)	PDF.m ² .an	3,7E-02	3,3E-02	4,1E-02	3
Énergie Primaire (CED)	MJ	1,3E+01	1,1E+01	1,3E+01	3
Déchets radioactifs (Rad)	dm ³	5,8E-05	4,9E-05	6,7E-05	5
Effet de serre (100 ans) (GWP)	gCO ₂ eq	8,4E-02	2,9E-02	1,6E-01	39
Épuisement des ressources abiotiques (ADP)	kgSbeq	6,6E-04	2,1E-04	1,3E-03	44
Eutrophisation (EP)	kg PO ₄ eq	1,0E-03	7,7E-04	1,5E-03	11
Dommages à la santé humaine (DALY)	DALY	2,6E-07	2,1E-07	3,2E-07	9
Odeur (Odor)	Mm ³ air	6,9E+02	3,9E+02	1,4E+03	16
Déchets non radioactifs (Waste)	kg	5,3E-02	3,6E-02	7,3E-02	16
Ozone photochimique (POP)	kgC ₂ H ₄	2,3E-05	1,1E-05	4,5E-05	30
Consommation d'eau (Water)	dm ³	5,8E+00	5,1E+00	6,6E+00	4

* Ecart-type divisé par la moyenne

La prise en compte des variations horaires de la production électrique pour l'évaluation des impacts environnementaux apparaît comme justifiée dès que le procédé consommateur d'électricité n'a pas une consommation constante sur l'année ou qu'il existe un procédé dont la production est intermittente (e.g. photovoltaïque). La Figure 59 illustre sous forme de boîte à moustaches la variation de la valeur des indicateurs environnementaux par kWh fourni au cours d'une année. Les impacts sont normalisés par rapport à leur valeur moyenne sur l'année. Les extrémités des moustaches représentent les valeurs minimales et maximales, les bords de la boîte représentent les 1^{er} et 3^{ème} quartiles.

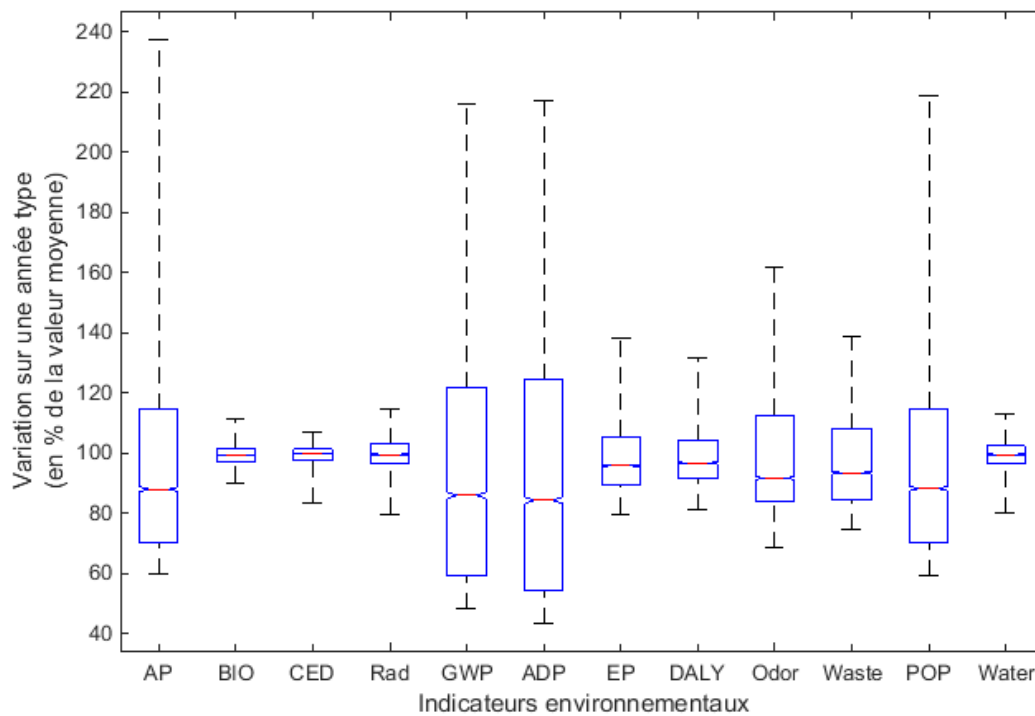


Figure 59 : Variation de la valeur des indicateurs par kWh fourni au cours d'une année (en % de la moyenne annuelle).

Le facteur d'émissions de gaz à effet de serre du mix moyen annuel a été comparé à d'autres valeurs issues de la littérature : travaux de Herfray (Herfray, 2011a), base de donnée ecoinvent (Treyer et Bauer, 2014) ainsi qu'à la moyenne considérée dans la méthode Bilan Carbone⁶² (ADEME, 2010a) et la valeur donnée dans les Déclarations Environnementales et Sanitaires (DES), utilisées par le logiciel d'ACV bâtiment Elodie. La comparaison est présentée à la Figure 60. Les résultats obtenus dans cette thèse (indiqués « Roux 2015 » sur la Figure 60) sont présentés sous la forme d'une boîte à moustaches. Au lieu de la médiane habituellement représentée, la croix centrale indique l'impact du mix moyen annuel afin de correspondre aux autres valeurs présentées. La « boîte » représente les valeurs allant du premier au troisième quartile, les « moustaches » vont du minimum au maximum de l'impact sur l'ensemble des heures de l'année.

⁶² Cette méthode propose des facteurs d'émission par type d'usage

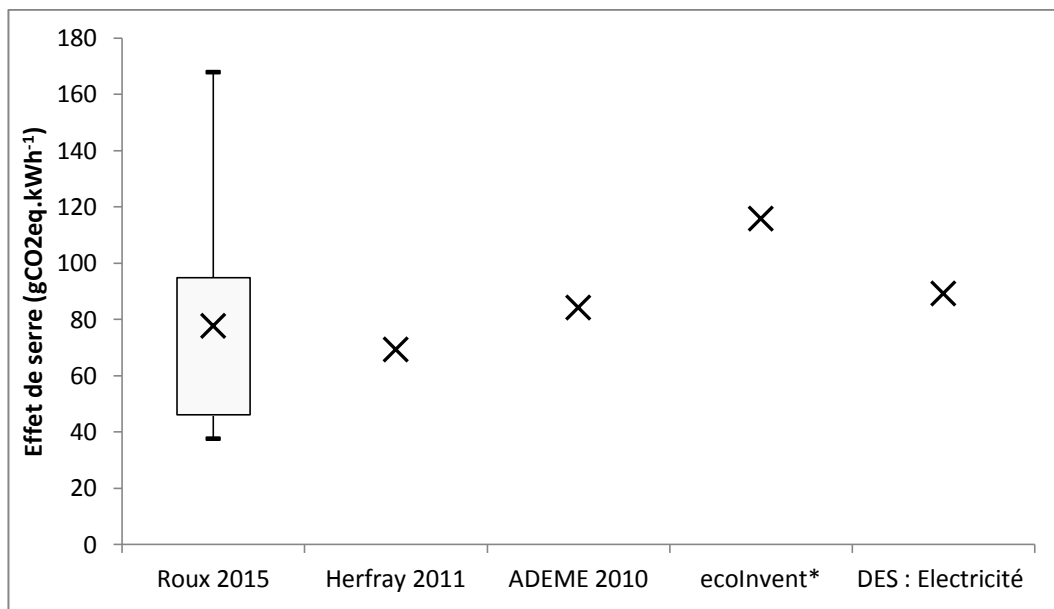


Figure 60 : Comparaison du facteur d'émission de gaz à effet de serre moyen par kWh fourni (gCO₂.kWh⁻¹) *Procédé ecoinvent : market for electricity, low voltage [FR] (basé sur l'année 2008)

Sur la Figure 60, un rapport de 1,7 entre la valeur la plus petite (Herfray) et la valeur la plus haute (ecoinvent) est constaté. Dans ecoinvent, les impacts sont évalués en se basant sur les données de production électrique de l'année 2008. L'année 2010 est utilisée dans les DES et une période longue mais ancienne (1998-2003) est utilisée dans la méthode ADEME.

L'utilisation de données antérieures à 2010 ne permet pas de tenir compte de l'essor récent des énergies renouvelables, éolien en particulier. On voit également que la variabilité interannuelle des impacts peut être forte (ecoinvent vs DES).

Cela renforce l'intérêt d'une méthode se basant sur une année type (lissant les aléas climatiques) et un système électrique de référence (permettant de tenir compte de l'installation de nouvelles technologies) telle que proposée dans cette thèse.

La valeur basse obtenue par Herfray est liée au faible nombre de technologies incluses dans le modèle. Les données de production de seulement trois groupes (Nucléaire, Hydraulique et Fossiles) étaient disponibles en 2011, alors que 12 technologies différentes ont pu être intégrées dans le modèle présenté ici. La restriction à trois groupes de production a conduit à négliger l'hétérogénéité des productions fatales (présence de combustibles fossiles gaz et fioul notamment).

3.3.5. Conclusion

L'approche attributionnelle dynamique est basée sur des valeurs horaires de production électrique. Une procédure spécifique a été développée pour tenir compte des systèmes de stockage comme les STEP.

Elle intègre de façon fine les variations climatiques et de l'état du système électrique. Elle fait correspondre une augmentation de la consommation en électricité du bâtiment/quartier due par exemple à une vague de froid à une variation des impacts environnementaux de la production électrique due à cette même vague de froid. Une stratégie d'effacement de la pointe pourra être valorisée même si la consommation totale du bâtiment est identique voir supérieure à une consommation sans effacement ; e.g. on surchauffe le bâtiment avant l'heure de pointe pour pouvoir éteindre le chauffage à l'heure de pointe (Favre, 2013 ; Robillart, 2015).

Toutefois, elle ne permet pas de tenir compte d'effets marginaux sur le système (existe-t-il des moyens de production contraints ?) ou d'effets structurels liés à certains usages (e.g. pointe saisonnière due au chauffage électrique). En effet, pour cette approche, le même mix horaire est utilisé pour tous les usages. Alors que les ballons d'eau chaude à accumulation fonctionnent de façon assez homogène toute l'année, et en heures creuses, ils sont évalués avec le même mix que le chauffage électrique qui fonctionne davantage l'hiver.

Le cas de la production locale d'énergie par les bâtiments (photovoltaïque, cogénération, etc.) donne des résultats sujets à discussion dans le cas de l'application de la méthode des impacts évités. Cette méthode suppose que la production excédentaire exportée vers le réseau permet d'éviter les impacts correspondants aux moyens de production qui aurait été mis en œuvre pour couvrir la demande. Or le mix utilisé pour calculer les impacts évités contient une part non négligeable d'énergies fatales (p. ex. photovoltaïque), qui par essence ne peuvent pas être modulées. Celles-ci ne peuvent donc pas diminuer leur production en conséquence d'un surplus de production apporté par le bâtiment ou le quartier étudié. Cette approche est justifiée lorsque la production fatale est négligeable devant la production modulable centralisée, comme c'était le cas jusqu'en 2008 en France. La production hors nucléaire, hydraulique⁶³ et centrales à flamme (gaz, charbon, fioul) représentait alors moins de 2 % de la production électrique totale (RTE, 2009). Aujourd'hui, la production fatale renouvelable (éolien, solaire, biomasse, biogaz – hors hydraulique au fil de l'eau) et issue de l'incinération des déchets représente près de 5 % de la production totale (RTE, 2013c) et peut dépasser 15 % durant certaines heures de l'année (à l'image du

⁶³ Hydraulique fatal et modulable

dimanche 23 juin 2013 par exemple⁶⁴). Ceci remet en cause l'utilisation de la méthode des impacts évités dans le cas d'une étude attributionnelle. Une méthode de type co-produit, qui néglige la production exportée mais alloue les impacts de la fabrication des composants (p. ex. fabrication des panneaux photovoltaïques) au bâtiment au prorata de l'énergie autoconsommée paraît plus appropriée dans ce cas.

Cette approche ne permet donc pas de répondre de façon totalement satisfaisante à la question de l'évaluation du bénéfice environnemental à allouer à un bâtiment pour sa production excédentaire d'électricité (ou plus généralement, d'énergie). Cette approche ne tient également pas compte des aspects prospectifs.

Afin de tenir compte premièrement des effets structurels et des contraintes de production et de résoudre le cas des impacts évités par la production locale d'énergie, deux approches dites « conséquentielles » ont été développées et sont décrites dans les paragraphes suivants.

⁶⁴ Chiffre éco2mix <http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-mix-energetique>

3.4. APPROCHES CONSÉQUENTIELLES COURT TERME

3.4.1. Objectifs

Les approches conséquentielles, ou « marginales » cherchent à évaluer de façon plus réaliste les conséquences d'une consommation ou production supplémentaire d'électricité sur le fonctionnement du système électrique. Elles sont centrées sur la prise en compte des contraintes actuelles de production : les productions non modulables (fatales, saturées, etc.) sont exclues et on traite les problèmes d'allocations par expansion du système – aussi appelées substitutions (Weidema et al., 2009). Concernant les technologies de production d'électricité, les contraintes peuvent être de nature diverse :

- Contrainte de modulation : les technologies dites « fatales », comme l'éolien ou le photovoltaïque, ne peuvent augmenter leur production si la demande d'électricité augmente. Éventuellement, elles peuvent baisser leur production (ralentissement des pales éoliennes par exemple) dans le cas d'une baisse de production, mais c'est au détriment du rendement (l'électricité non produite est définitivement perdue).
- Contrainte en ressource : les ressources hydrauliques sont limitées et exploitées entièrement. Si la production hydraulique peut moduler sa production d'une heure sur l'autre, sa production totale d'énergie électrique sur une année ne peut être ajustée.
- Contrainte en puissance : certaines heures de l'année, notamment en hiver, la production nucléaire est à son maximum (exploitation de la totalité des capacités disponibles) et ne peut donc augmenter sa production.

Seuls les effets de court terme sont modélisés dans cette partie : les capacités installées sont considérées comme fixes. La consommation d'électricité sur le système français étant aujourd'hui stable, voire en légère croissance, l'augmentation de la consommation liée à la construction de nouveaux bâtiments va être satisfaite, à court terme, par les technologies pouvant effectivement moduler leur production.

Il existe plusieurs méthodes pour quantifier ces effets marginaux et déterminer la production d'électricité « à la marge » d'un groupe de technologies, selon que l'on considère une ou plusieurs technologies marginales, le court ou le long terme

et la dynamique des systèmes de production ou les seuls coûts (Mathiesen et al., 2009). Deux méthodes marginales sont proposées dans cette thèse. La première, appelée « GHG-P », est construite à partir des recommandations du *GHG Protocol*⁶⁵ pour les projets connectés au réseau (GHG Protocol, 2007). La deuxième est basée sur l'utilisation du modèle de fonctionnement du système électrique présenté dans le chapitre précédent ; elle est appelée « marginale dérivée ». Selon la classification donnée par Mathiesen (2009), elles correspondent toutes les deux à la détermination d'un mix complexe de technologies marginales, reposant sur une modélisation de la production au pas de temps horaire.

3.4.2. Approche marginale GHG-P

Un guide méthodologique du GHG Protocol (GHG Protocol, 2007)⁶⁶ a été développé dans le but d'évaluer les réductions d'émissions de gaz à effet de serre pour les projets connectés au réseau dans le cadre des mécanismes de développement propre. La formule générale permettant de calculer les émissions évitées par le projet, $ER_{baseline}$, est :

$$ER_{baseline} = w \times BM + (1 - w) \times OM \quad 3-11$$

où BM est la part correspondant aux infrastructures qui auraient été développées en l'absence du projet, OM représente les émissions de la production marginale à capacité fixe et w est un facteur entre 0 et 1 permettant de pondérer l'effet sur les infrastructures (long terme) et l'effet sur la production (court terme). Un arbre de décision permet ensuite de déterminer le facteur w en fonction de l'état actuel du réseau (situation de surcapacité, de sous-capacité chronique) et du type de projet considéré (nouvelle capacité de production, production modulable). Dans le cas d'une augmentation de consommation due à l'installation de nouveaux bâtiments on a $w = 0$. Dans le cas de l'installation de production locale d'énergie, l'équation 3-12 peut être utilisée:

$$w = \frac{P_{mod}}{P_{nom} \times F_c} \quad 3-12$$

Où P_{mod} représente la puissance qui aurait été installée en l'absence de la réalisation du projet, P_{nom} est la puissance nominale installée et F_c le facteur de charge moyen. La production photovoltaïque étant nulle la nuit, on peut poser $w = 0$.

⁶⁵ Protocole sur les gaz à effet de serre : ensemble de guides méthodologiques développés par le World Resource Institute (WRI) et le World Business Council on Sustainable Development (WBCSD) pour le reporting des émissions de gaz à effet de serre des projets, entreprises, organisations et activités. <http://www.ghgprotocol.org/>

⁶⁶ <http://www.ghgprotocol.org/standards/project-protocol>

Seuls les effets de court terme sont évalués dans ce chapitre, donc on pose $w = 0$ quel que soit le projet considéré⁶⁷. Sur la base des recommandations données pour le calcul des émissions de court terme, et des données de production d'électricité « type » disponibles grâce au modèle de mix développé dans le chapitre 2, la procédure suivante est proposée pour évaluer la production d'électricité marginale à une heure donnée et les impacts environnementaux associés :

- 1) La production « type » des différentes technologies est classée pour chaque heure de l'année dans l'ordre du *merit order* : technologies fatales (productions décentralisées ENR et non-ENR, hydraulique au fil de l'eau), production hydraulique, nucléaire, gaz, charbon⁶⁸, technologies de pointes (importations nettes, turbine à combustion, fioul).
- 2) Le niveau de production à la marge est fixé à un certain pourcentage de la production totale à chaque heure, la valeur de 10 % est recommandée comme une règle d'expert par le GHG Protocol. Les technologies en haut du *merit order* satisfaisant la marge de la production sont utilisées pour dériver un mix marginal à chaque heure de l'année.
- 3) Les impacts environnementaux de ce mix électrique marginal sont déterminés de la même façon que pour la méthode marginale « dérivée ».

L'adaptation de la méthode GHG dans le cadre de cette thèse est renommée « GHG-P » (P pour « Projet »). Le schéma de la Figure 61 résume les 4 étapes de la méthodologie GHG-P pour l'évaluation des impacts environnementaux de la production marginale d'électricité à une heure h quelconque de l'année.

⁶⁷ Dans les exemples donnés par le GHG protocol pour évaluer la valeur de w , on considère l'objectif du projet : A-t-il été développé dans le but de renforcer le réseau ? Dans le cas des bâtiments, les décisions ne sont pas prises conjointement avec les gestionnaires du réseau, ce qui implique de considérer $w = 0$.

⁶⁸ On considère que l'évolution probable des prix sera favorable au gaz (taxe carbone).

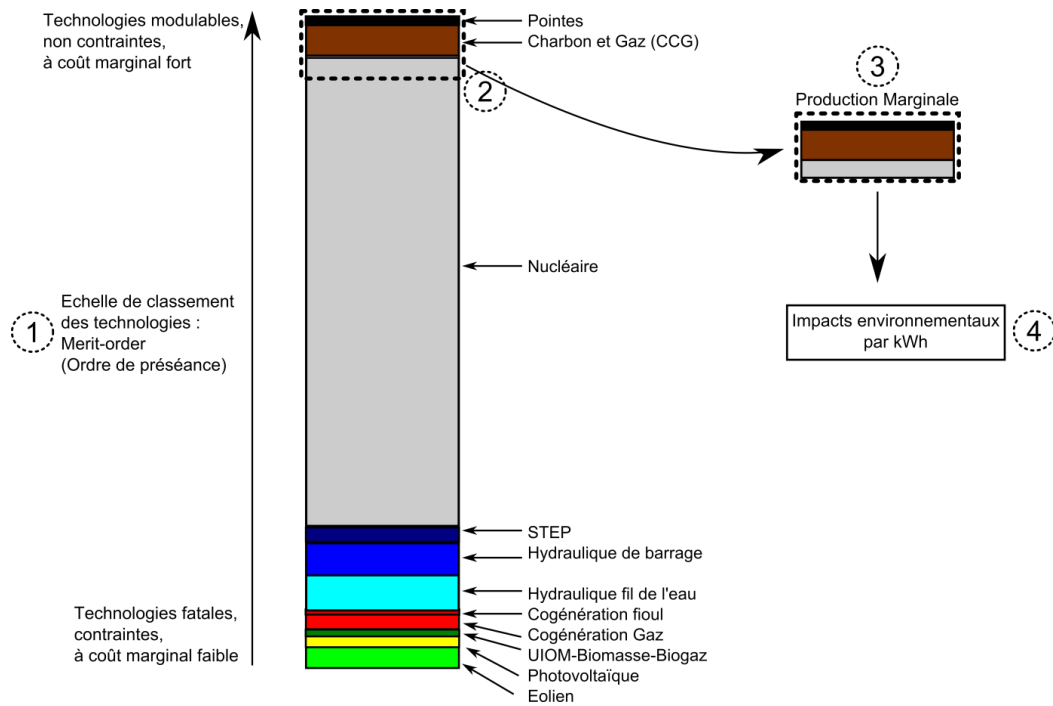


Figure 61 : Les 4 étapes de la méthodologies GHG-P

3.4.3. Approche marginale dérivée

L'approche marginale « dérivée » implique une utilisation assez différente du modèle de production électrique par rapport à l'approche moyenne horaire. Le modèle de simulation de la production électrique est sollicité deux fois : une fois pour satisfaire une consommation « type » française (somme de la consommation nationale, des exportations et du pompage) (C_{FR}), une deuxième fois pour satisfaire la somme de cette même consommation type et de la consommation nette ($C_{bat} - l_{PLEE} \times PLE_{exp}$) (telle que définie au paragraphe 3.2.5) du projet étudié. L'approche est représentée de façon schématique sur la Figure 62.

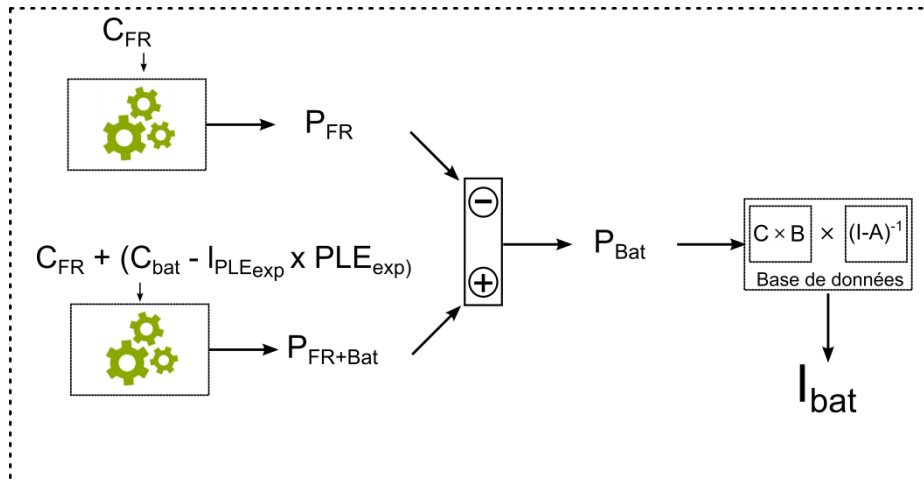


Figure 62 : Méthodologie de l'approche conséquentielle marginale court terme

P_{FR} et P_{FR+Bat} représentent la production électrique pour chaque technologie, évaluée à chaque heure de l'année satisfaisant respectivement C_{FR} et $C_{FR} + (C_{bat} - I_{PLE_{exp}} \times PLE_{exp})$. La différence entre les deux résultats de production totale sur l'ensemble de l'année pour chaque technologie P_{Bat} (voir Figure 62) est la production affectée à la consommation nette du bâtiment, c'est-à-dire la production marginale. L'inventaire d'impact I_{bat} résultant de cette production est évalué en rapportant la production $P_{Bat,i}$ de chaque technologie i à son impact par kWh I_i tel que défini dans le paragraphe 3.2.4 :

$$I_{bat} = \sum_{i=1}^{N_{tech}} I_i \times P_{Bat,i} \quad 3-13$$

Comme précisé et argumenté dans le Chapitre 2, seules les technologies nucléaires, hydraulique modulable, charbon et gaz centralisés, et pointes peuvent être mobilisées pour la satisfaction de la demande marginale. Les possibles variations du niveau des exports ou de production des STEP ne sont pas considérées. Une justification de cette approximation est exposée dans le Chapitre 2, paragraphe 2.4.3.6.

3.4.4. Analyse des résultats

3.4.4.1. MÉTHODE « GHG-P » VERSUS MÉTHODE DÉRIVÉE

Les mix marginaux moyens selon la méthode GHG-P ont été calculés pour 4 cas de figure, comprenant deux niveaux de marginalité à 5 ou 10 % de la production électrique totale et deux possibilités pour le *merit order* : soit le gaz est plus cher que le charbon (situation actuelle), soit le charbon est plus cher que le gaz (situation la plus fréquente jusqu'en 2011 et présumée future dans l'optique d'une taxe carbone).

Un mix marginal « moyen » a été défini au Chapitre 2, paragraphe 2.4.3.6 comme le mix marginal permettant de couvrir une demande supplémentaire de 1 MW à chaque heure de l'année. Par rapport à la Figure 62, la demande supplémentaire ($C_{bat} - P_{bat}$) vaut alors 1 MW quelle que soit l'heure de l'année. Le mix marginal moyen 1 MW est majoritairement constitué de centrales charbon et gaz (61,9 %) et de nucléaire (38,1 %) ; les technologies de pointes (fioul, turbines à combustion) ont une faible contribution (1,0 %).

Le Tableau 29 donne les mix marginaux obtenus pour les 4 cas proposés pour la méthode GHG-P et le résultat pour le mix marginal moyen avec la méthode « marginale dérivée ». Les mix marginaux sont calculés en moyenne sur l'année (moyenne des mix marginaux).

On constate premièrement que les deux cas GHG-P à 10 % de marginalité sont équivalents. Cela est dû au fait qu'à chaque heure de l'année, la somme des productions thermiques fossiles fioul, gaz et charbon est inférieure à 10 % de la production totale. Toute leur production est prise en compte et leur prix relatif n'a donc pas d'impact sur le calcul du mix marginal.

En baissant le niveau de marginalité pour la méthode GHG-P (en passant de 10 à 2 % de marge opérative), on se rapproche des résultats de la méthode « dérivée » pour la part de nucléaire. Cependant, la baisse du niveau de marginalité fait augmenter la proportion des pointes de façon importante alors qu'elle reste très modérée dans la méthode dérivée. Ceci est lié à la prise en compte de façon dynamique de la production marginale d'électricité dans la méthode dérivée. La valeur de 10 % de marge opérative proposée dans le « *GHG protocol* » peut être discutée avec les gestionnaires du réseau. Pour un réseau important comme la France, elle peut être plus faible que 10 % - une valeur de 5 % est considérée comme alternative dans la méthode proposée.

Tableau 29 : Mix marginaux moyen sur l'année selon la méthode GHG-P

Moyenne annuel des mix marginaux	Pointe (%)	Charbon (%)	CCG (%)	Nucléaire (%)
10 % Charbon > CCG	1	18	12	70
5 % Charbon > CCG	1	35	13	51
10 % Charbon < CCG	1	18	12	70
5 % Charbon < CCG	1	24	24	51
2 % Charbon < CCG	3	15	48	35
Mix marginal, méthode dérivée, demande constante	1,0	37,1	24,8	37,1
Mix marginal, méthode dérivée, demande 0,1% de la demande totale	1,3	39,9	26,6	32,3

La Figure 63 présente les répercussions de ces différences de mix marginaux sur les impacts environnementaux par kWh pour une demande constante sur l'année. Les indicateurs sont exprimés par rapport à la méthode dérivée (100 %). On constate que la part de charbon dans le mix marginal est déterminante pour une majorité des impacts environnementaux. Le mix à 5 % considérant un coût marginal de production du charbon plus élevé que celui du gaz est le plus proche de la méthode dérivée au niveau des impacts environnementaux. Les résultats des méthodes marginales restent dans le même ordre de grandeur, de 0,5 à 1,4 fois la méthode marginale dérivée.

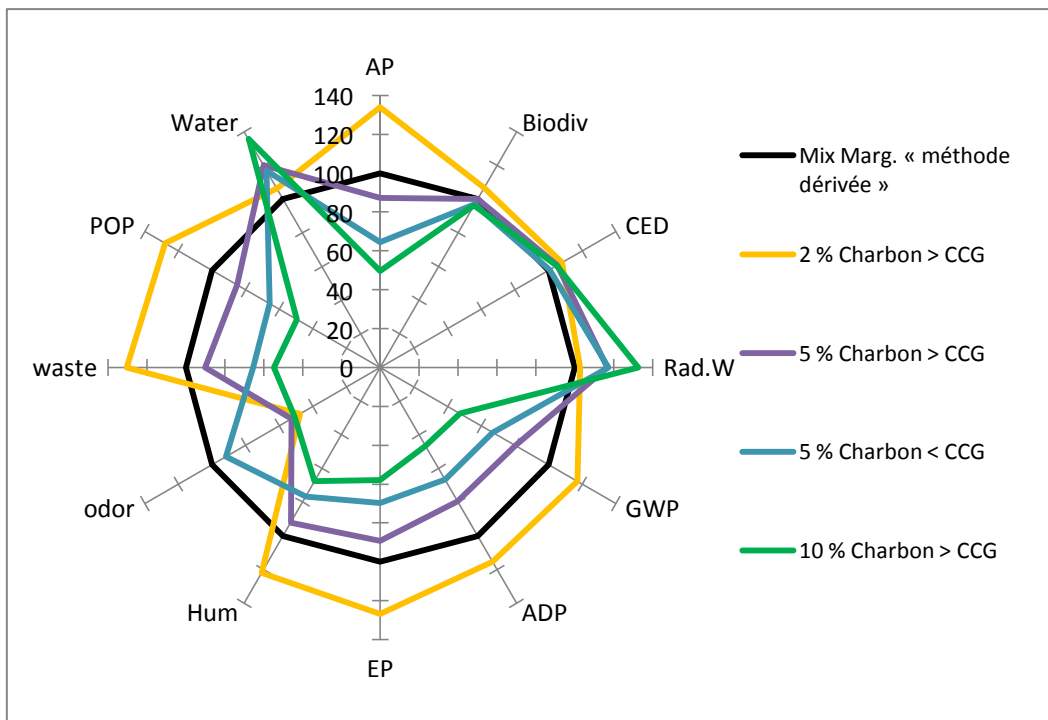


Figure 63 : Impacts environnementaux des méthodes marginales GHG-P par rapport à la méthode « dérivée » (base 100)

3.4.4.2. MÉTHODES MOYENNES ET MÉTHODE MARGINALES

Le Tableau 30 compare les impacts environnementaux par kWh fourni sur le réseau basse tension, en utilisant une approche attributionnelle dynamique ou une approche marginale (« marginale dérivée ») pour cette demande constante de 1 MW.

Tableau 30 : Approche attributionnelle dynamique et approche marginale dérivée

Par kWh	Unité	Approche moyenne	Approche marginale	Différence* (%)
Acidification	kgSO ₂ eq	4.49E-04	3.17E-03	150
Biodiversité	PDF.m ² .an	3.39E-02	4.31E-02	24
Énergie primaire	MJ	1.29E+01	1.37E+01	6
Déchets Rad.	dm ³	6.02E-05	3.13E-05	-63
Effet de serre	kgCO ₂ eq	7.89E-02	6.05E-01	154
Épuisement des ressources	kgSbeq	5.91E-04	4.99E-03	158
Eutrophisation	kgPO ₄ ³⁻	1.56E-04	4.68E-04	100
Santé humaine	DALYs	2.26E-07	5.80E-07	88
Odeur	Mm ³	9.42E+02	1.68E+03	56
Déchets	t	5.14E-02	2.06E-01	120
Ozone photochimique	kgC ₂ H ₄	2.13E-05	1.44E-04	148
Eau	dm ³	5.98E+00	4.47E+00	-29

*Différence (marginal – moyen) divisée par la moyenne des deux mix.

Les différences sont beaucoup plus importantes entre méthodes moyennes et marginales par rapport aux différences observées entre les méthodes moyennes (annuelle ou horaire).

Les impacts du mix marginal sont supérieurs au mix moyen de façon significative pour 9 indicateurs sur 12. Les indicateurs qui augmentent le plus sont ceux qui sont liés à la production d'électricité à partir de combustibles fossiles (Gaz et Charbon principalement) : l'acidification, l'effet de serre, l'épuisement des ressources, et l'ozone photochimique. Pour ces indicateurs, l'amplitude de la différence entre les deux approches est d'environ un ordre de grandeur. En revanche, l'indicateur d'énergie primaire varie peu. L'absence des technologies renouvelables et la présence des technologies thermiques gaz et charbon fait augmenter l'indicateur mais cette hausse est compensée par une plus faible contribution du nucléaire. Le nucléaire étant moins présent dans le mix marginal que dans le mix moyen, les indicateurs de génération de déchets nucléaires et de consommation d'eau sont plus bas pour le mix marginal.

3.4.5. Discussion et conclusion sur les approches conséquentielles

Les approches marginales évaluent de façon plus réaliste que les méthodes moyennes les conséquences d'une consommation supplémentaire d'électricité imposée au système de production. Concernant la modélisation des impacts évités, l'utilisation des méthodes marginales n'introduit pas d'incohérences liées au type de production évitée comme c'est le cas pour les méthodes moyennes (e.g. photovoltaïque évitant du photovoltaïque). Cette technique de modélisation, également appelée «expansion du système» est par ailleurs préconisée dans le cadre des études conséquentielles afin d'éviter les problématiques d'allocation (Ekvall et Weidema, 2004). Cette méthode est cependant plus sensible aux incertitudes du modèle et aux hypothèses prises, notamment la part de charbon dans la production fossile modulable.

La demande marginale constituée par la consommation d'électricité d'un bâtiment ou d'un quartier est très faible par rapport à la consommation totale d'électricité imposée au système électrique. Afin de s'assurer de la robustesse des résultats lors de l'application du modèle à un projet de bâtiment ou de quartier, il est important de montrer que la demande marginale se situe dans la «plage de validité», ou «plage de linéarité» des effets marginaux. Par construction, la méthode GHG-P peut toujours être appliquée car le mix marginal à chaque heure ne dépend pas de la consommation marginale imposée. Cependant, le test de linéarité doit être effectué pour l'application de la méthode «marginale dérivée» en testant des multiples de la demande marginale, de 10^{-2} à 10^{+2} , et en s'assurant que le mix marginal reste inchangé. Un calcul de ce type a été présenté dans le Chapitre 2 (paragraphe 2.4.3.6): le modèle est linéaire pour une demande marginale constante de 1 W à 10 MW.

La modélisation statique de l'approche GHG-P à partir de la production électrique de référence est moins précise que la méthode dérivée et surestime la part des technologies de pointe dans le mix marginal. Cependant, cette méthode est plus robuste que la méthode dérivée dans le sens où elle évite l'apparition d'erreurs numériques en cas de demande marginale trop basse. Dans les cas où la méthode dérivée ne peut être utilisée, la méthode GHG-P représente une alternative.

La méthode GHG-P est applicable sur une production d'électricité de référence qui serait issue d'une autre modélisation, p.ex. modélisation prospective. Elle est plus simple à mettre en œuvre et plus rapide que la méthode «marginale dérivée». La rapidité peut être importante dans le cas d'analyse de sensibilité et d'incertitude ou le nombre de simulation est très grand, en général supérieur à 1000.

Les approches marginales sont valides pour l'évaluation d'un projet de nouveau bâtiment ou un projet de rénovation, mais pas pour faire un bilan du parc existant. Ces approches pourraient néanmoins être améliorées :

- Certaines productions considérées comme fatales peuvent déjà ou pourront bientôt moduler leur production : c'est le cas de la production éolienne. Le modèle ne considère pas cette modulation, qui pourrait être également assortie d'un lien explicite avec le pompage des STEP (Abdelouadoud et al., 2013 ; Abdelouadoud, 2014). Ceci n'a aucune conséquence actuellement mais est un paramètre nécessaire pour envisager une transition vers un mix électrique 100 % renouvelable.
- Les offres d'effacement se développent. Le modèle les intègre de façon implicite dans la courbe de charge de la consommation nationale. Ces offres contribuent à lisser la courbe de charge en effaçant une consommation au moment de la pointe pour la reporter à un autre moment où la demande est plus faible. Elles pourraient être intégrées au modèle comme « moyen de production » à part entière autorisé à répondre à une variation de la demande si le prix de l'électricité est suffisamment élevé (p.ex. une entreprise est rétribuée pour son effacement).
- La modélisation des échanges aux frontières pourrait être effectuée de façon plus détaillée afin de tenir compte des parcs installés et des contraintes présentes dans les pays voisins. Ceci suppose une quantité conséquente de données à intégrer au modèle. Actuellement, le solde exportateur est évalué et intégré à la demande totale en électricité puis les importations sont considérées comme un moyen de production de pointe. Les impacts environnementaux des importations sont évalués en considérant les mix moyens des pays exportateurs.

Dans la suite de ce chapitre, on privilégie l'étude des effets de court terme et seule la méthode dérivée est considérée.

3.5. APPLICATION SUR UNE ÉTUDE DE CAS SIMPLE

3.5.1. Introduction

Les travaux présentés jusqu'ici ont d'abord permis de justifier l'utilisation d'une approche conséquentielle dans le cadre de l'écoconception des ensembles bâtis. Après un état des lieux sur l'ensemble des méthodologies correspondant à cette approche (Chapitre 1), des lacunes ont été identifiées et en partie comblées (Chapitre 3 et Chapitre 1) concernant l'évaluation des impacts générés ou évités par la consommation ou la production locale d'électricité par les ensembles bâtis.

Le but des méthodologies développées est d'améliorer l'aide à la décision apportée par les outils d'analyse de cycle de vie en phase amont des projets de construction ou de rénovation de bâtiment ou de quartier. Il est donc nécessaire d'intégrer ces travaux dans des outils permettant d'effectuer l'analyse du cycle de vie complète des bâtiments et les quartiers (Figure 64). Il est également important d'intégrer les méthodologies déjà existantes recensées dans le Chapitre 1 et correspondant à une approche conséquentielle.

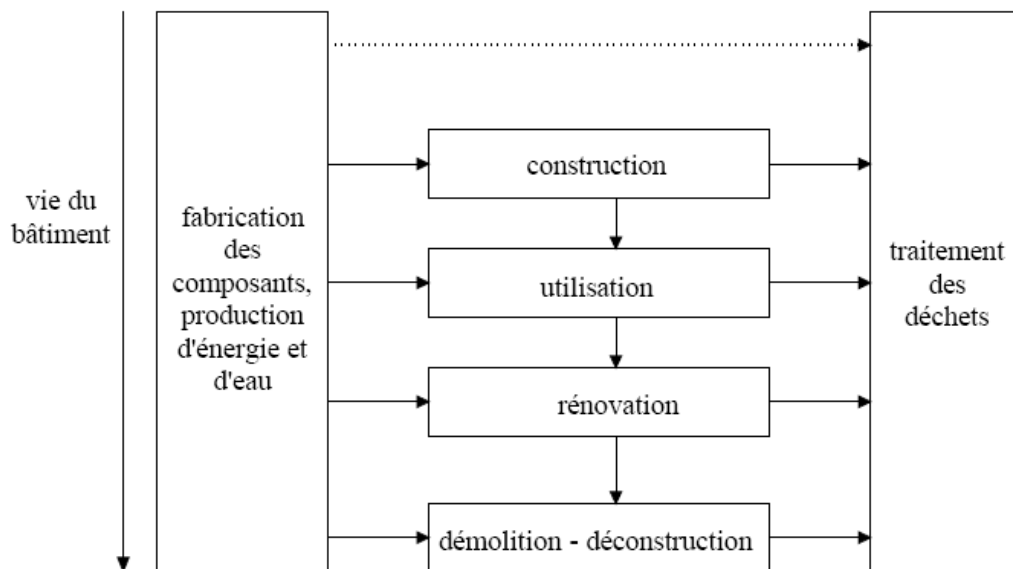


Figure 64 : Les phases du cycle de vie d'un bâtiment, extrait de Polster (B. Polster, 1995)

Les différentes méthodologies développées ont été implémentées dans une chaîne logicielle dont les deux dernières briques permettent la réalisation d'une

ACV d'un bâtiment ou d'un quartier. Dans la suite, la description de la chaîne logicielle est suivie par celle de la procédure suivie pour l'implémentation des différents modèles présentés dans les premières parties de ce chapitre. Enfin les différentes approches méthodologiques implémentées sont testées sur un cas simple, une maison individuelle performante située à Chambéry.

3.5.2. *Présentation de la chaîne logicielle*

Les différentes méthodologies ont été implémentées dans la chaîne logicielle Alcyone-Pléiades+COMFIE-novaEQUER. La chaîne se décompose en trois étapes : la saisie graphique du projet à partir des plans d'architecte, la simulation thermique dynamique du projet, l'analyse de cycle de vie des bâtiments puis de l'ensemble du quartier (Figure 65).

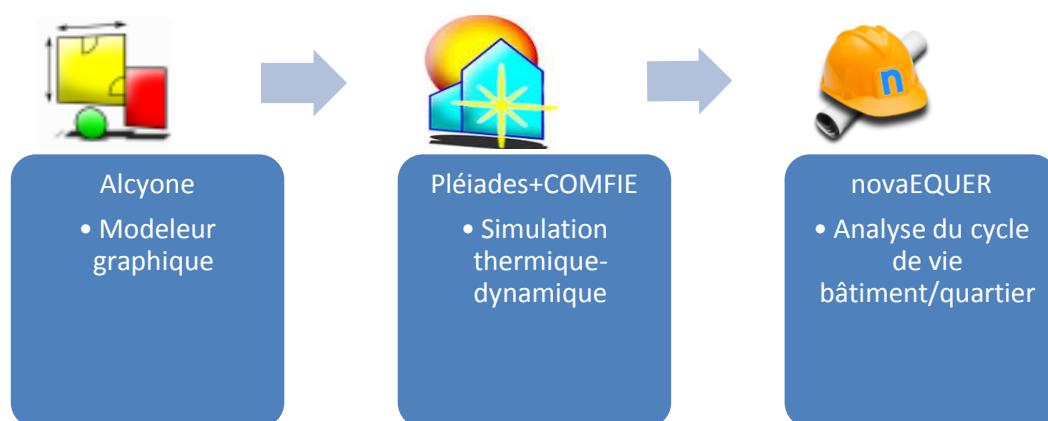


Figure 65 : Présentation de la chaîne logicielle

Une présentation détaillée des différents modules logiciels de la chaîne est proposée en Annexe K.

3.5.3. *Implémentation des approches court terme proposées*

Les approches attributionnelles dynamiques et marginales décrites précédemment ont été implémentées dans la chaîne logicielle. L'intégration à la chaîne logicielle doit permettre plusieurs fonctionnalités. Outre le bilan des impacts environnementaux liés à la consommation ou à la production d'électricité, la mise à jour du modèle doit être également accessible : mise à jour du mix électrique (p. ex. capacités installées), mise à jour de la base de

données environnementales (p. ex. nouvelle version de ecoinvent) ou mise à jour du référentiel météorologique. De plus, les calculs doivent rester rapides afin de ne pas compromettre de futurs développements du logiciel, par exemple pour les calculs d'incertitude et de sensibilité, très gourmands en temps de calcul. La procédure a donc été découpée en 2 étapes :

- L'initialisation ou le paramétrage du modèle – Il permet à l'utilisateur de modifier les paramètres du modèle développé au Chapitre 2 (p. ex. capacités installées du système électrique) ou de mettre à jour les données par rapport aux nouvelles versions de base de données environnementales. Cette étape est celle qui demande le plus de temps de calcul et n'est pas destinée à être effectuée de nombreuses fois pour un même projet (sauf éventuellement dans un cadre de recherche).
- Le calcul des impacts du projet – Il permet d'évaluer les impacts environnementaux liés à l'électricité selon les trois méthodes court terme développées au Chapitre 1 : attributionnelle dynamique, par usage et dynamique marginal.

Le schéma général de l'implémentation informatique est présenté à la Figure 66, selon la méthode utilisée : les méthodes attributionnelle dynamique et par usage suivent la même procédure (d, e, f, g), la méthode marginale est implémentée de façon différente (d', e', f', g).

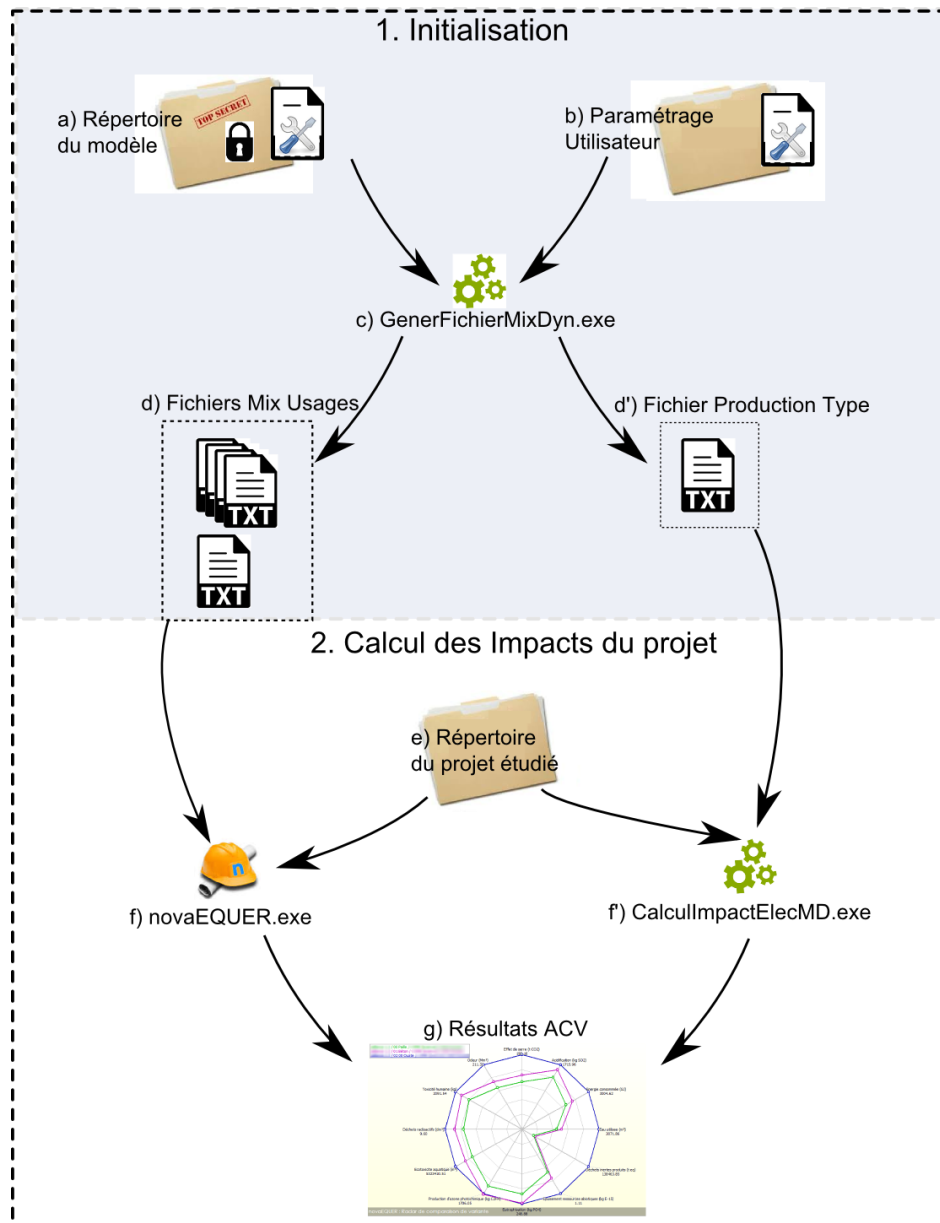


Figure 66 : Structure de l'implémentation informatique

Les différents éléments dans cette structure sont :

- a) Répertoire du modèle : contient les fichiers textes du paramétrage initial du modèle (modèle de référence, tel que défini au Chapitre 2).
- b) Les fichiers texte du paramétrage peuvent être modifiés par l'utilisateur, mais seulement dans un dossier annexe afin que les fichiers initiaux soient conservés et que le modèle puisse être réinitialisé.
- c) Génération des fichiers de base nécessaires aux méthodes développées : « Fichier Mix Usage » pour les méthodes attributionnelles dynamique et par usage, « Fichier Production Type » pour la méthode marginale. Les exécutables correspondants sont détaillés dans les paragraphes suivants.
- d) et d') Stockage des fichiers de base.

- e) Répertoire du projet étudié : contient les informations sur la consommation/production horaire d'électricité du projet étudié. Calcul des impacts environnementaux liés à l'électricité à partir des fichiers de base.
- f) Intégration du résultat dans l'ACV du projet étudié et affichage dans l'interface de novaEQUER.

Trois fonctionnalités additionnelles sont nécessaires pour chacune des approches : le calcul des impacts environnementaux à partir des fichiers de base de données, la mise à jour des paramètres du système électrique et la mise à jour des données environnementales.

3.5.4. Présentation de l'étude de cas simple

Les différentes approches méthodologiques développées ont d'abord été testées sur un cas simple : une maison individuelle performante. Quatre maisons de taille et de géométrie équivalente ont été construites sur la plateforme expérimentale INCAS, de l'INES, située près de Chambéry (voir Figure 67). Elles diffèrent seulement par leur mode constructif : béton banché, double mur, ossature bois ou brique. Ces maisons ont été l'objet de plusieurs travaux de recherche dans les rapports desquels elles sont plus précisément décrites (Spitz et al., 2012a ; CEA, 2010 ; Pannier, 2014). Les caractéristiques principales des maisons sont rappelées dans la suite, mais plus d'informations sont disponibles dans les travaux sus-cités.



Figure 67 : Photo des trois premières maisons construites sur la plateforme INCAS

La surface habitable est de 90 m² répartie sur 2 étages (voir Figure 68). On considère qu'une famille de 4 personnes y habite (les apports liés à l'occupation sont représentés par des résistances chauffantes dans les maisons). Atteindre le niveau « maison passive » impose une limitation des besoins de chauffage à 15 kWh.m⁻².an⁻¹ maximum et un débit d'infiltration inférieur à 0,6 Vol.h⁻¹ en surpression à 50 Pa⁶⁹.

⁶⁹ Test de la porte soufflante.

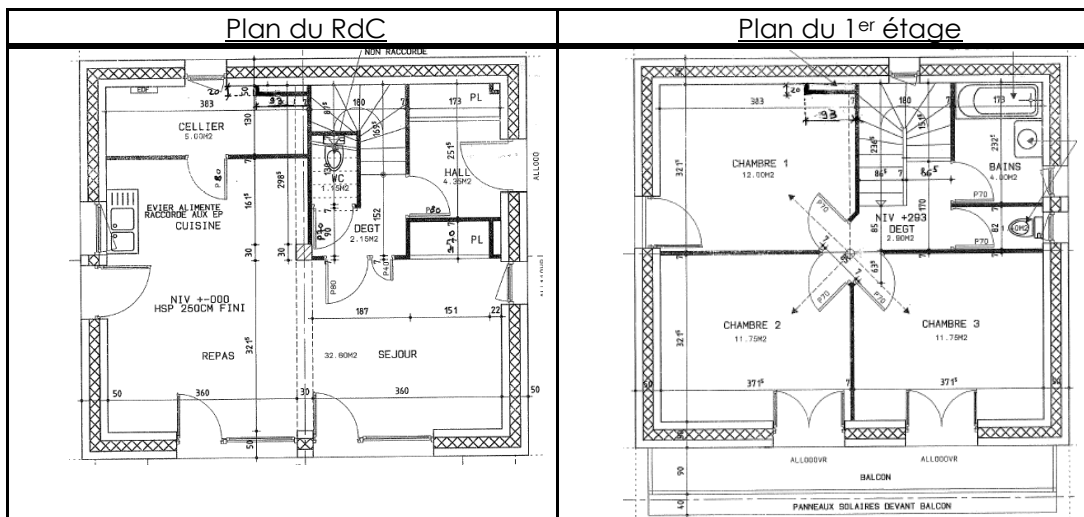


Figure 68 : Plan des Maisons INCAS, (Pannier, 2014)

La composition des murs extérieurs pour chaque principe constructif est donnée dans le Tableau 31.

Tableau 31 : Composition des murs INCAS (Pannier, 2014)

Dénomination	Composition	Remarques
IDM	Double mur : deux couches de blocs creux en béton séparés par de la laine de verre	Inertie lourde 1 ^{ère} maison bâtie
IBB	Béton banché : enveloppe en béton et isolation par l'extérieur avec du polystyrène extrudé	Inertie lourde 2 nd e maison bâtie
IOB	Ossature bois et laine de bois pour l'isolation	Inertie moyenne 3 ^{ème} maison bâtie
IMA	Briques monomur	Inertie lourde 4 ^{ème} maison bâtie

Dans cette étude, seules les maisons Béton banché (IBB) et Ossature bois (IOB) seront étudiées. L'objectif de l'étude est d'analyser l'influence de l'approche méthodologique sur l'aide à la conception apportée par l'analyse de cycle de vie du bâtiment. Trois cas d'aide à la conception sont analysés :

- choix d'un principe constructif (béton ou bois) ;
- choix d'un système de chauffage (électrique, pompe à chaleur, chaudière gaz, chaudière bois) ;
- mise en place de production d'énergie renouvelable sur site (panneaux solaires thermiques, panneaux photovoltaïques, micro-cogénération bois).

Deux approches méthodologiques sont comparées :

- approche attributionnelle ;
- approche conséquentielle.

L'ensemble des hypothèses nécessaires pour la réalisation de l'étude thermique est présenté en premier, suivi des résultats de la simulation thermique dynamique. Les principales hypothèses posées pour la réalisation de l'analyse du cycle de vie

complet de la maison sont ensuite détaillées. La dernière partie présente les résultats et leur interprétation quant à la question posée.

3.5.5. Simulation thermique dynamique

3.5.5.1. MODÉLISATION DES MAISONS INCAS

Environnement proche

Les maisons INCAS ont une surface habitable de 90 m² pour une surface hors œuvre nette de 120 m². Elles sont construites sur un vide sanitaire. Les combles ne sont pas habités et sont considérés comme fortement ventilés (température identique à la température extérieure). L'albédo des abords des maisons est fixé à 0,2. Aucun masque proche n'est considéré, un horizon (masque lointain) est déjà pris en compte dans les données météorologiques. Les données météorologiques utilisées pour la simulation sont celles de la réglementation thermique 2012. Chambéry correspond à la zone thermique H2c, représentée par la ville de Mâcon. La simulation thermique dynamique a été réalisée de façon détaillée, en considérant 11 zones thermiques, soit quasiment une zone par pièce. Le zonage est indiqué à la Figure 69.

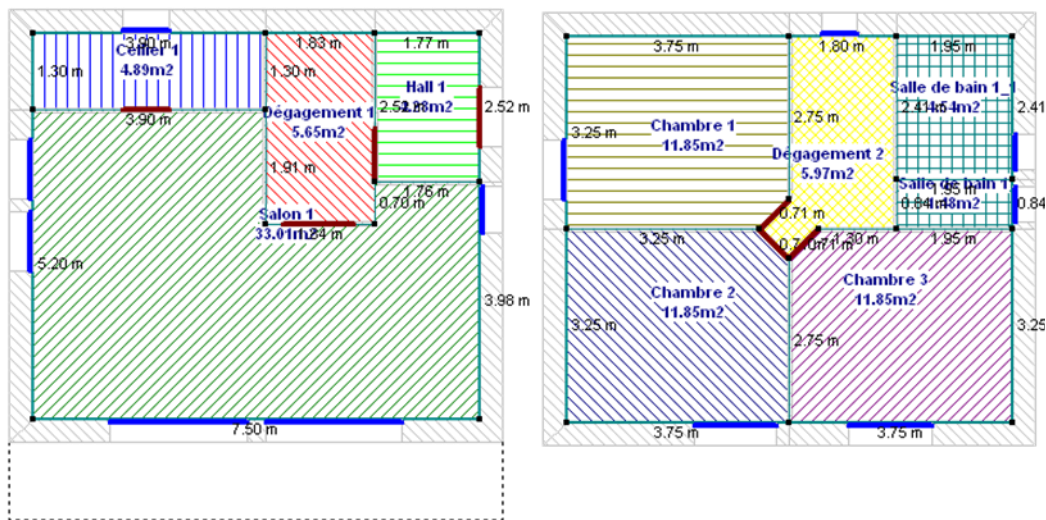


Figure 69 : Zonage thermique des Maisons INCAS

Composition des parois et isolation

Les épaisseurs d'isolants ont été calculées afin d'avoir une résistance thermique équivalente dans les deux maisons. Pour les murs extérieurs, on obtient 20 cm de polystyrène extrudé dans la maison I-BB pour 54 cm de laine de bois dans la maison I-OB. Les menuiseries sont identiques dans les deux maisons. La composition de l'ensemble des parois est donnée en Annexe L.

Ponts thermiques

Les ponts thermiques considérés sont ceux donnés dans le référentiel de la réglementation thermique 2012. Ils sont présentés dans le Tableau 32. Plus de détails sur la détermination des ponts thermiques des maisons INCAS sont disponibles dans le rapport de Pannier (2014). Le fait que les ponts thermiques soient généralement plus importants dans la maison en bois est un problème de disponibilité du référentiel RT : les maisons INCAS possèdent de nombreux rupteurs de ponts thermiques, selon des configurations qui ne sont pas disponibles dans le référentiel.

Tableau 32 : Ponts thermiques linéiques considérés

	I-BB RT	I-OB RT
	ψ [W/(m.K)]	ψ [W/(m.K)]
Angle sortant	0,11	0,18
Plancher bas	0,47	0,47
Plancher haut	0,06	0,09
Plancher intermédiaire	0,09	0,15
Seuil porte Rdj	0,79	0,7
Seuil porte R+1	0,41	0,35
Appui menuiserie	0,36	0,24
Linteau menuiserie	0,04	0,1
Tableau menuiserie	0,04	0,1

Scénarios de fonctionnement

On fait l'hypothèse que la maison est occupée par une famille comprenant deux adultes et deux enfants. Afin de se rapprocher des scénarios les plus réalistes possibles, nous utilisons les travaux réalisés par Vorger (2014) sur le comportement des habitants dans les bâtiments. Ces travaux sont basés sur une approche stochastique statistique utilisant un grand nombre de données de campagnes de mesures françaises, notamment les enquêtes emploi du temps menées par l'INSEE.

Les scénarios d'occupation, de consigne de chauffage et de puissance dissipée utilisés dans cette étude sont extraits de ces travaux pour une maison individuelle située en zone rurale. Trois semaines de vacances où les occupants sont absents sont considérées dans ce modèle : deux semaines en Août (n°32 et n°33) et une semaine en décembre (n°49). Pour ces semaines particulières, la consigne de chauffage est réduite à 7°C, l'occupation est nulle, ainsi que la puissance dissipée (mise hors tension). Le scénario de puissance dissipée donne

sur l'année une consommation équivalente en électricité spécifique de 3224 kWh (éclairage et ventilation inclus). Ceci est proche des valeurs de consommation moyenne par ménage mesurée par RTE pour l'année 2013 : 3200 kWh (RTE, 2014).

Équipements

Le chauffage installé dans les maisons INCAS est un chauffage par air : une résistance chauffante est intégrée dans le circuit de ventilation. Une ventilation double flux est installée. Son efficacité est fixée à 0,9. Un ballon de 300 L stocke l'eau chaude sanitaire.

Différents systèmes solaires pouvant être considérés dans l'étude ont les caractéristiques suivantes :

- 4 m² de panneaux solaires thermiques plans vitrés, orientés Sud et inclinés à 71,7° (installés sur le balcon) ;
- 39,3 m² de panneaux solaires polycristallins en surimposition sur la toiture, orientés Sud, inclinés à 26,5°.

3.5.5.2. RÉSULTATS DE LA SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE

Besoins de chauffage

Les besoins de chauffage obtenus par simulation thermique dynamique (STD) pour les deux maisons étudiées sont donnés dans le Tableau 33. Les résultats sont très proches avec moins de 1 % d'écart entre les besoins de chauffage.

Tableau 33 : Résultats de la STD

	Besoins de chauffage (kWh/an)	Apports Internes (appareils kWh/an)	Apports Internes (métaboliques kWh/an)	Tmax Séjour (°C)
Maison I-BB	1173	3224	1494	30,5
Maison I-OB	1177	3224	1494	30,8

Production photovoltaïque

Au total le système photovoltaïque installé en toiture produit presque 5000 kWh par an. La répartition mensuelle de la production est donnée à la Figure 70.

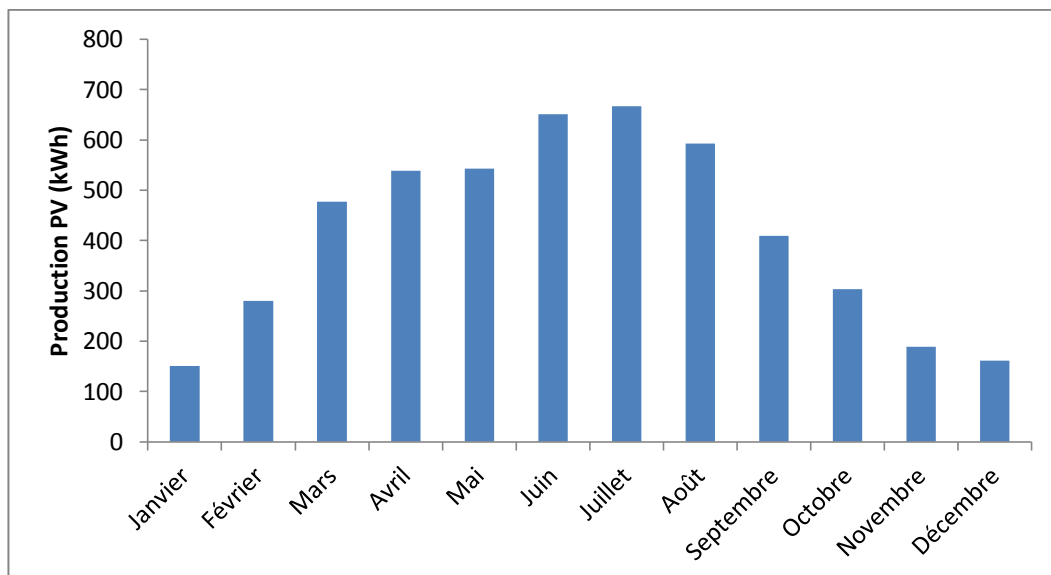


Figure 70 : Production photovoltaïque mensuelle (kWh)

Production d'eau chaude sanitaire avec ou sans système solaire

Les besoins d'eau chaude sanitaire ont été calculés avec et sans le système solaire thermique décrit au paragraphe 3.5.5.1 - Équipement. En l'absence de système solaire thermique, on considère l'utilisation d'un ballon à accumulation fonctionnant seulement durant les heures creuses de la nuit. La demande mensuelle d'énergie pour l'ECS est présentée à la Figure 71 pour chacun des cas. La fraction solaire du système combiné solaire thermique est de 78 %. On constate que les besoins estivaux sont couverts en quasi-totalité par le système solaire.

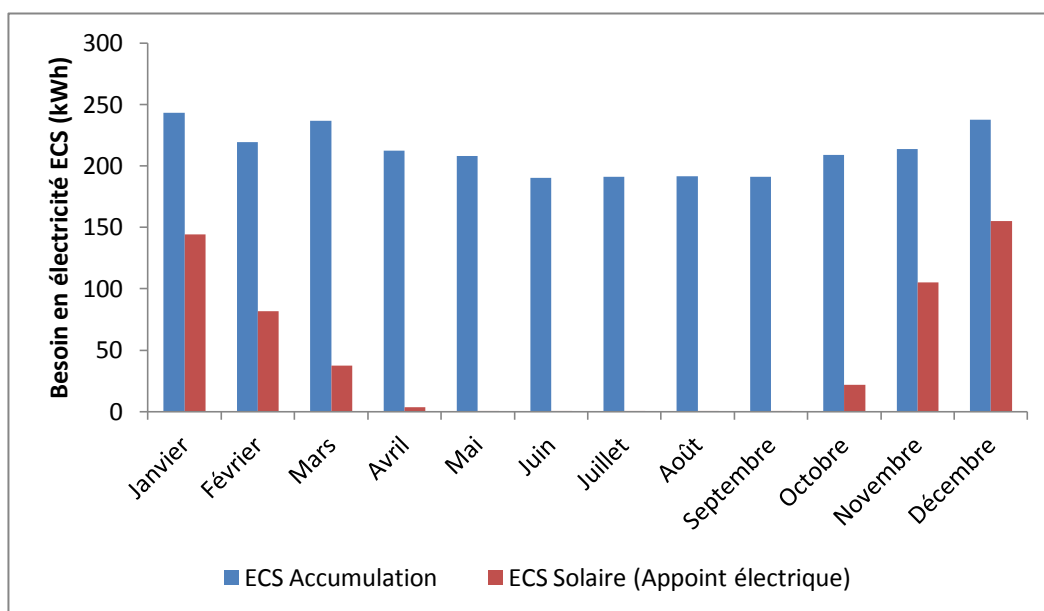


Figure 71 : Besoins mensuels en électricité (kWh) pour l'ECS avec et sans système solaire

3.5.6. Analyse du cycle de vie : hypothèses

Périmètre d'étude

Le transport des habitants et la génération de déchets ménagers sont exclus de cette étude qui se concentre sur l'aide à la conception d'une maison individuelle localisée à Chambéry. L'ensemble des matériaux de construction, des consommations d'énergie et d'eau sur l'ensemble du cycle de vie de la maison est considéré. Les infrastructures nécessaires au fonctionnement du bâtiment sont incluses (réseaux d'eau, réseaux d'électricité).

Durées de vie de la structure et des composants

La durée de vie de la maison est fixée à 80 ans. Les équipements ont une durée de vie supposée de 20 ans, les menuiseries de 30 ans et les revêtements de 10 ans.

Des besoins aux consommations

Le rendement des chaudières est fixé à 102 % PCI pour une chaudière à gaz et à 75 % PCI pour le bois. Ces valeurs de rendement correspondent aux valeurs associées aux procédés de la base de données ecoinvent pour une chaudière moderne à condensation modulable de puissance inférieure à 100 kW et pour une chaudière bois-bûche moderne de 6 kW.

Quantitatifs des matériaux et correspondance avec la base de données environnementale

Une hypothèse de surplus chantier de 5 % est considérée, de façon identique pour les deux systèmes constructifs. Chaque composant est lié à un inventaire de flux issu de la base de données ecoinvent v3. Le nom de l'ensemble des procédés retenus est disponible en annexe. On pose l'hypothèse que l'ensemble des matériaux de la filière bois sont certifiés.

La base de données utilisée propose souvent des moyennes européennes ou suisses pour les matériaux de construction. Le mix électrique est ajusté au mix français afin de contextualiser ces données lorsque la probabilité que les matériaux soient produits en France est grande (p. ex. matériaux pondéreux). Selon l'approche suivie (ACVA ou ACVC) un mix annuel moyen ou marginal est considéré pour l'ajustement du mix électrique.

Hypothèses sur la fin de vie des matériaux

En fin de vie du bâtiment, on considère que 66 % de l'ensemble des déchets inertes (béton, terre, céramique, etc.) est récupéré pour servir de remblai routier ou transformé en granulats après triage et broyage. Ils remplacent des granulats naturels concassés. Les 34 % restants sont envoyés en décharge ISDI (Installation de stockage de déchets inertes). Ces chiffres sont issus des données statistiques

de l'ADEME concernant le traitement des déchets minéraux non dangereux en 2012 (ADEME, 2015a). Le cycle de vie simplifié des matériaux inertes et les frontières considérées en ACVA ou ACVC sont représentés à la Figure 72.

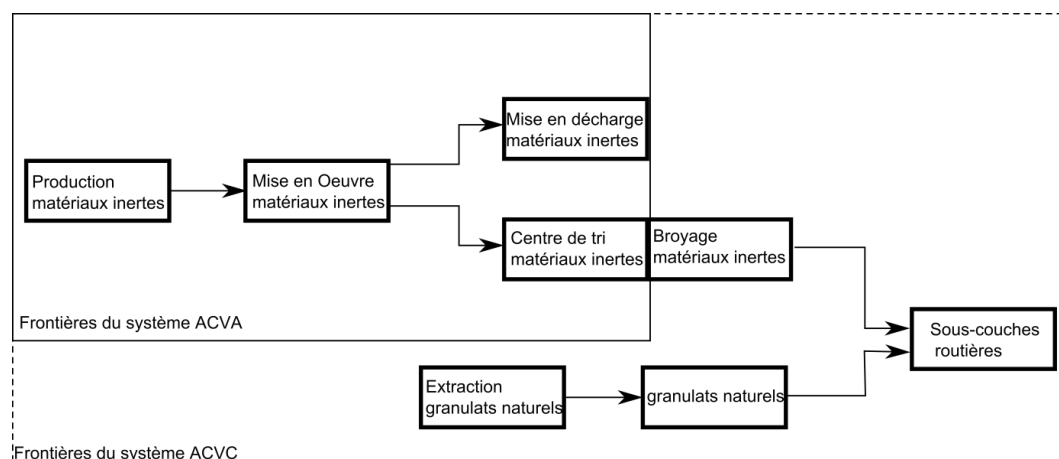


Figure 72 : Cycle de vie des matériaux inertes et frontières du système selon l'approche de modélisation

Le devenir des matériaux en bois au moment de la démolition du bâtiment est estimé suivant les données d'une enquête de l'ADEME sur l'évaluation du gisement de déchets bois publiée en 2015⁷⁰. 40 % des matériaux bois (bois d'œuvre, poutre, planches, etc.) sont destinés à la valorisation matière et sont broyés pour produire des panneaux de particules. Leur utilisation évite la consommation de rondins de bois issus de l'activité forestière, également utilisés pour produire des panneaux de particules. 35 % sont incinérés avec valorisation énergétique. On considère que la chaleur récupérée évite l'utilisation de gaz naturel. Les 25 % restants sont envoyés en site d'enfouissement ISDND (Installation de stockage de déchets non dangereux). Le cycle de vie simplifié des matériaux bois et les frontières considérées en ACVA ou ACVC sont représentés à la Figure 73.

31 % des matériaux combustibles restants (dérivés de bois, polystyrène, autres plastiques) sont considérés comme incinérés pour produire de la chaleur (incinérateur de déchets). Cela permet de remplacer l'utilisation de gaz naturel. Les 69 % restants sont envoyés en décharge ISDND. Le pourcentage de valorisation énergétique correspond par défaut à la moyenne française pour les ordures ménagères et assimilées (ADEME, 2015a). Le rendement des incinérateurs de déchets est fixé à 53,9 % pour la production de chaleur seule⁷¹.

⁷⁰ <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/evaluation-gisement-bois-201505-synthese.pdf>

⁷¹ Ce chiffre a été déterminé à partir des quantités de déchets incinérés en France, selon les données de l'ADEME (http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/adm00013687_adm_attache1.pdf, p. 52-53) et de la quantité d'énergie produite par rapport à l'énergie vendue dans

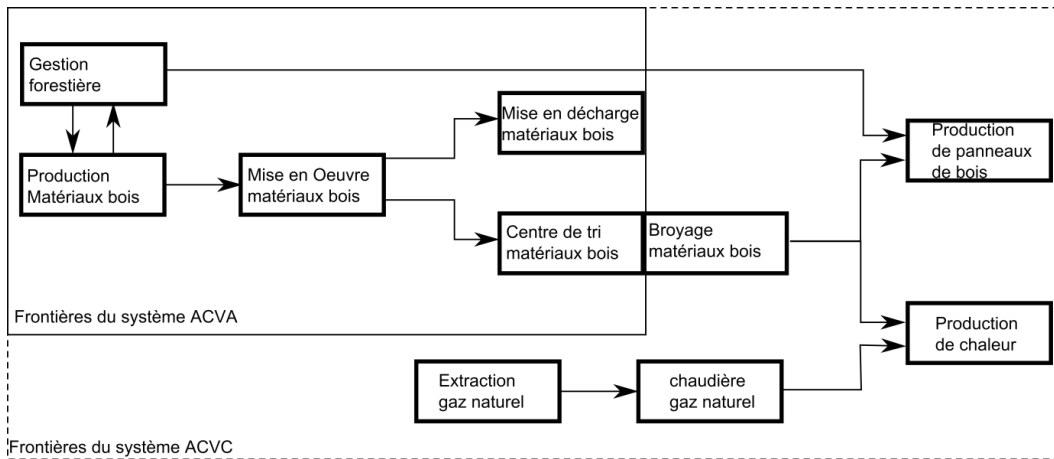


Figure 73 : Cycle de vie des matériaux bois et frontières du système selon l'approche de modélisation

Les matériaux contenant du plâtre doivent être traités de façon spécifique en fin de vie. Le plâtre peut engendrer la formation d'hydrogène sulfuré s'il est au contact de matières putrescibles ou d'eau (Kintz, 2012). Les panneaux de gypse et de plâtre ou placoplâtre doivent donc être placés dans des conteneurs spécifiques. On considère donc que ces déchets sont placés en centre d'enfouissement pour déchets non dangereux. La laine de verre est incombustible ; on fait l'hypothèse qu'elle est envoyée en site d'enfouissement ISDND.

les UIOM en France (<http://www.ademe.fr/installations-traitement-ordures-menageres-ifom-resultats-2010>). La valeur moyenne pour le PCI des déchets incinérés considérée est de 7,2 MJ/kg et provient des données compilées par l'association AMORCE dans une étude sur les UIOM publiée en octobre 2011 (<http://www.amorce.asso.fr/fr/espace-adherents/publications/rdc/valorisation-energetique/dt-40-rce13-performances-et-recettes-des-unites-de-valorisation-energetique-des-ordures-menageres/>)

Tableau 34 : Résumé des différences méthodologiques entre les approches attributionnelle et conséquentielle

Hypothèses de modélisation	Attributionnelle	Conséquentielle-Projet
Fabrication des matériaux	Technologie(s) moyenne(s)	Technologie(s) marginale(s)
Carbone biogénique	Bilan neutre	Bilan différencié
Utilisation de matériaux recyclés – bénéfice intégré–	Méthode des stocks 100 %	Prise en compte des contraintes de marché : 0 ou 100 %
Recyclage/valorisation en fin de vie des matériaux – bénéfice intégré–	Méthode des stocks 0 %	Prise en compte des contraintes de marché : 0 ou 100 %
Export d'énergie/ Coproducton	Méthode des coproduits : allocation des infrastructures de production	Méthode des impacts évités : substitution des technologies marginales
Système de modélisation de la base de données pour l'arrière-plan	<i>Cut-off</i>	<i>Allocation at the Point Of Substitution (APOS)</i>

Pour la méthode des stocks, la règle de *cut-off* pour la fin de vie des matériaux recyclés est positionnée au niveau du centre de tri. On considère le transport des matériaux recyclés vers le centre de tri mais les impacts générés ou évités par le recyclage ne sont pas pris en compte.

L'électricité spécifique n'est pas prise en compte sauf comme consommation évitée en présence d'un système de production locale d'énergie. Cette consommation est considérée comme une conséquence de l'activité des occupants et non comme une conséquence du bâti, à l'instar de leurs déplacements quotidiens et de leur production de déchets ménagers. La puissance dissipée par les appareils électriques et électroniques est cependant prise en compte pour l'évaluation des besoins de chauffage.

La consommation d'eau chaude sanitaire est par contre prise en compte puisqu'elle peut être satisfaite par différents systèmes, potentiellement liés au système de chauffage. Ces systèmes sont choisis au moment de la conception du bâtiment car des aménagements spécifiques peuvent être nécessaires (p. ex. espace de stockage de bois dans le cas d'une chaudière bois).

3.5.7. Résultats et interprétation

Les premiers résultats présentés sont ceux de l'analyse de contribution. Celle-ci donne une estimation de l'importance de chaque contributeur (matériaux, chauffage, eau, etc.) dans le bilan final. Cette analyse de contribution à partir d'une variante de référence est la base sur laquelle vont être définies des pistes d'améliorations. Elle estime les gisements potentiels et les sources de réductions d'impact pouvant être obtenues à moindre coût.

Dans un deuxième temps, les pistes d'amélioration de la conception sont étudiées de manière plus précise : choix d'un système constructif, choix d'un système de chauffage puis possibilité de production locale d'énergie. Les paragraphes concernant le choix d'un système de chauffage et la production locale d'énergie montrent en particulier l'intérêt des méthodes développées au début de ce chapitre.

3.5.7.1. ANALYSE DE CONTRIBUTION

Le cas de référence utilisé pour l'analyse de contribution est la maison béton banché (I-BB) chauffée à l'électricité et sans installation solaire (ni ECS ni photovoltaïque). Les résultats en fonction de l'approche utilisée (ACVA ou ACVC) sont présentés à la Figure 74.

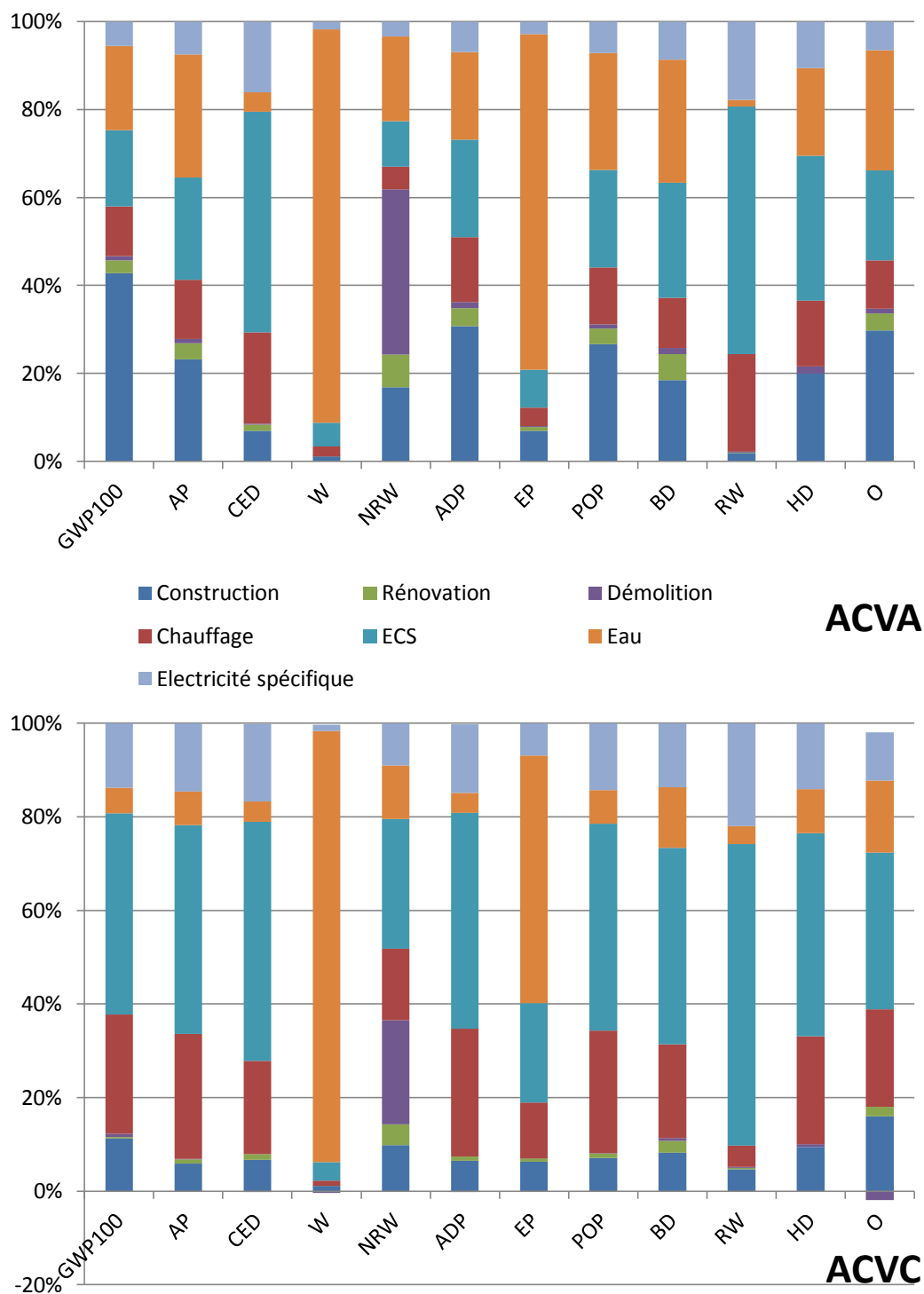


Figure 74 : Analyse de contribution de la maison IBB de référence en ACVA (haut) et ACVC (bas)

Les deux analyses de contribution – ACVA ou ACVC – font ressortir l'importance de la phase d'utilisation du bâtiment⁷² qui représente toujours plus de 60 % des impacts (sauf dans le cas de la production de déchets en ACVA). La phase d'utilisation a une contribution beaucoup plus importante en ACVC, ce qui est une conséquence directe de l'utilisation du mix électrique marginal à court terme.

Alors que la phase de construction peut être significative en ACVA, notamment concernant l'impact sur l'effet de serre (plus de 30 %), sa contribution est inférieure à 10 % en ACVC. La valeur absolue des impacts de la phase de construction varie peu entre les deux approches (de l'ordre de 1 % de différence due à la base de données utilisée) mais la part de la phase d'utilisation varie de façon très importante, ce qui explique le changement relatif de contribution.

La valeur négative observée en ACVC pour la phase de démolition sur l'indicateur d'odeur provient de la valorisation énergétique du polystyrène qui évite l'utilisation de gaz naturel.

L'utilisation de l'ACVC donne une importance accrue à la phase d'utilisation et oriente donc l'amélioration du bilan environnemental de cette maison déjà performante vers la production d'énergie sur site plutôt que vers l'utilisation de matériaux alternatifs.

Les impacts sont ensuite normalisés afin d'estimer l'importance relative des différentes thématiques environnementales par rapport au contexte français ou européen. Le résultat pour la maison de référence (IBB) et pour les deux méthodologies est donné à la Figure 75. La contribution des différents indicateurs est fortement dépendante de l'approche choisie. La faible importance des indicateurs de production d'ozone photochimique et de dommages à la biodiversité est cependant une constante. Dans le cas d'étude présentée ici, ces deux indicateurs sont considérés comme de moindre importance par rapport aux autres⁷³.

⁷² Chauffage-ECS-Eau-Electricité Spécifique

⁷³ Cette conclusion doit être remise en cause si les variantes évaluées sont très différentes. L'analyse pour la maison I-OB en ACVA ou ACVC donne des résultats similaires avec une importance très faible des indicateurs biodiversité et ozone photochimique par rapport aux autres indicateurs.

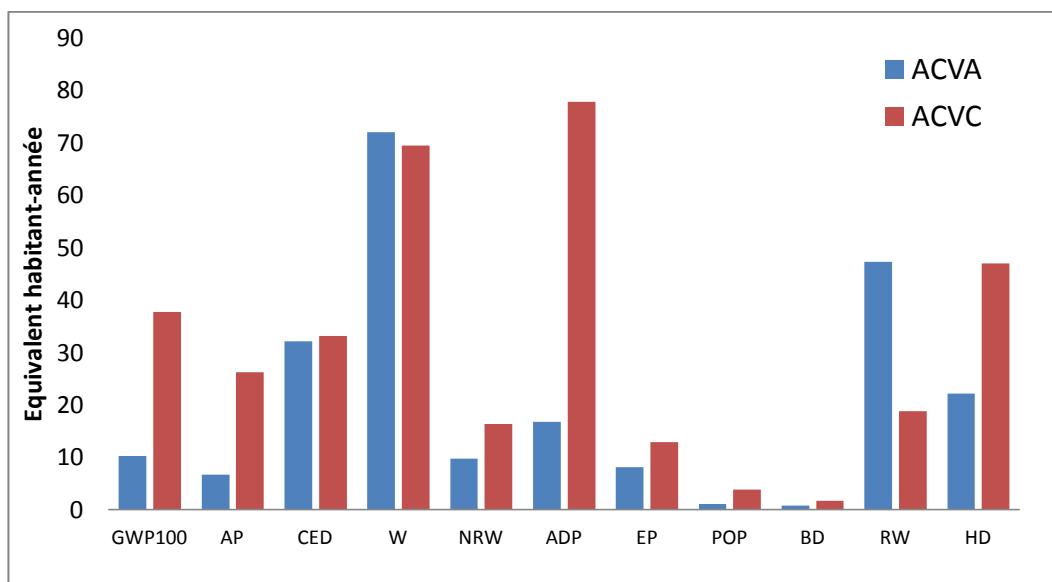


Figure 75 : Bilan environnemental normalisé en ACVA (bleu) et ACVC (rouge)

Les quatre indicateurs prédominants en ACVA sont l'eau utilisée, les déchets radioactifs et la demande cumulative d'énergie suivie des dommages à la santé. En ACVC, l'eau utilisée arrive en deuxième position derrière l'épuisement des ressources abiotiques et devant les dommages à la santé puis l'effet de serre. La valeur absolue de l'indicateur de consommation d'eau change peu entre les deux approches (diminution de 3,6 % en ACVC par rapport à l'ACVA) mais la valeur des indicateurs d'épuisement des ressources abiotiques, d'effet de serre augmente de façon importante.

L'utilisation du mix électrique marginal (composé majoritairement de charbon et de gaz) est la principale explication des différences observées entre les deux approches pour la maison IBB. En ACVC, La somme des impacts environnementaux associés au chauffage électrique, à l'eau chaude sanitaire (électrique) et à l'électricité spécifique contribue à plus de 80 % aux impacts sur la santé humaine (HD), à l'effet de serre (GWP100) et à près de 89 % de l'épuisement des ressources contre respectivement 59 % (HD), 34 % (GWP100) et 44 % (ADP) en ACVA.

3.5.7.2. CHOIX D'UN PRINCIPE CONSTRUCTIF

L'objectif de ce paragraphe est de comparer les résultats obtenus selon une approche attributionnelle et conséquentielle sur la variante béton et la variante bois. Le résultat de l'analyse comparative des deux systèmes constructifs est présenté à la Figure 76 pour l'approche ACVA et l'approche ACVC.

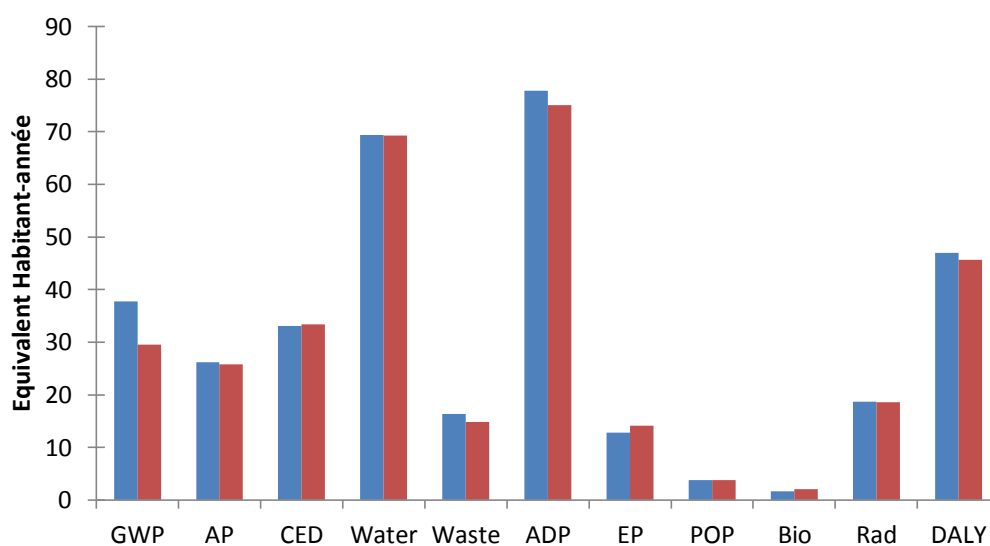
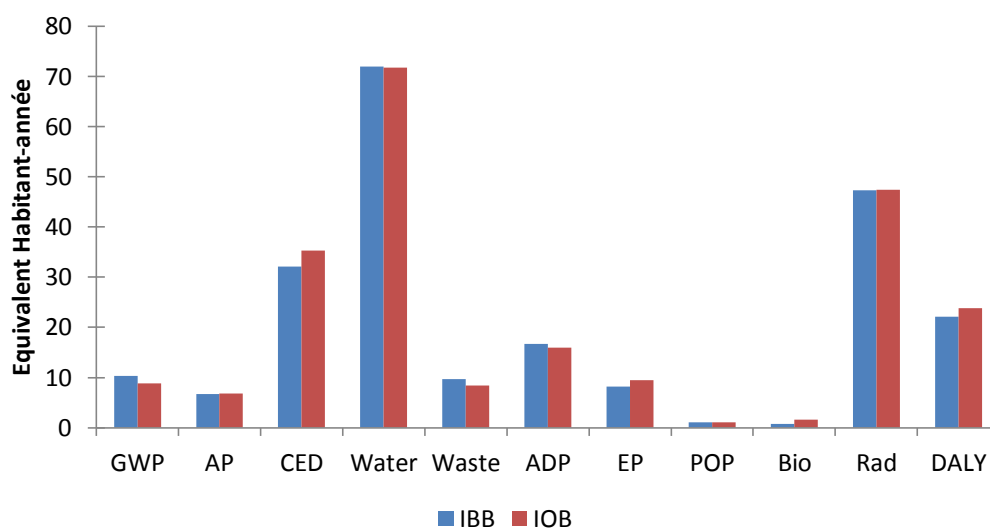


Figure 76 : Comparaison de variantes constructives bois (IOB) et béton (IBB) en ACVA (haut) et ACVC (bas)

En ACVA, la variante bois présente un bilan identique à la variante béton (moins de 5 % d'écart avec la variante béton) pour cinq indicateurs (acidification (AP), consommation d'eau (Water), épuisement des ressources abiotiques (ADP), production d'ozone photochimique (POP) et déchets radioactifs (Rad)). Cinq autres indicateurs donnent un avantage à la variante béton : la demande cumulative d'énergie (énergie primaire, CED), l'eutrophisation (EP), les dommages à la biodiversité (Bio), les dommages à la santé (DALY) et la génération d'odeurs⁷⁴. L'écart très important concernant les dommages à la biodiversité provient principalement de l'impact de l'usage des sols qui est élevé dans le cas des forêts. La production de bois est extensive et consomme une

⁷⁴ L'indicateur d'odeur n'est pas représenté sur la figure car il n'y a pas de facteur de normalisation correspondant.

surface importante en comparaison de la surface nécessaire à la production de béton, même si ces utilisations n'ont pas les mêmes conséquences. Deux indicateurs enfin sont favorables à la variante bois : l'effet de serre et la génération de déchets.

L'évaluation en ACVC est plus favorable à la variante bois. Ceci est dû principalement à la prise en compte des impacts évités comptabilisés lors de la valorisation énergétique du bois en fin de vie. La variante bois apparaît comme plus favorable pour 4 indicateurs (effet de serre, déchets produits, épuisement des ressources et odeur), similaire à la variante béton pour 5 indicateurs (acidification, consommation d'eau, production d'ozone photochimique, déchets radioactifs et dommages à la santé humaine), et moins performante que la variante béton pour trois indicateurs (énergie primaire, eutrophisation et dommages à la biodiversité).

Le Tableau 35 reprend pour chaque approche les cinq indicateurs dont la contribution en termes d'équivalent habitants-années est la plus élevée. Pour chaque indicateur, si l'écart entre les deux variantes est inférieur à 5 %, la case est jaune et l'indicateur n'est pas conclusif. Si l'écart est supérieur à 5 %, la variante la plus performante est marquée en vert et la moins performante en rouge.

Tableau 35 : Comparaison des variantes constructives sur la base des cinq indicateurs dont la valeur normalisée en équivalent habitants-année est la plus élevée

ACVA			ACVC		
Indicateurs prioritaires	IBB	IOB	Indicateurs prioritaires	IBB	IOB
Eau utilisée (W)	Yellow	Yellow	Épuisement des ressources (ADP)	Red	Green
Déchet radioactif (RW)	Yellow	Yellow	Eau utilisée (W)	Yellow	Yellow
Énergie primaire (CED)	Green	Red	Santé humaine (HD)	Yellow	Yellow
Santé humaine (HD)	Green	Red	Effet de serre (GWP)	Red	Green
Épuisement des ressources (ADP)	Yellow	Yellow	Énergie primaire (CED)	Green	Red

Ce tableau montre que le choix de l'approche influence les conclusions de l'étude. Dans le cas d'une approche ACVA, la variante béton peut être considérée comme plus performante, c'est l'inverse dans le cas d'une approche ACVC. Le fait que beaucoup d'indicateurs ne soient pas conclusifs provient de la prédominance de la phase d'utilisation dans le bien environnemental, phase qui n'est pratiquement pas impactée par le système constructif dans le cas précis présenté ici.

3.5.7.3. CHOIX D'UN SYSTÈME DE CHAUFFAGE

Dans le cas du choix d'un système de chauffage, seule la variante béton banché est analysée. Le système de chauffage assure le chauffage de l'eau et le chauffage du logement, sauf dans le cas de la PAC ou celle-ci n'assure que le chauffage.

Les différents types de chauffage possibles sont les suivants :

- chauffage électrique à air grâce à une résistance placée dans le circuit de ventilation et ballon électrique à accumulation ;
- chauffage au gaz par une chaudière à condensation modulante de rendement sur PCI égal à 102 % ;
- chauffage au bois par une chaudière bois bûche de rendement sur PCI égal à 75 % ;
- chauffage par pompe à chaleur air-air avec un COP moyen de 3 et chauffe-eau solaire (CESI).

L'analyse est focalisée sur les six indicateurs dont la contribution en termes d'équivalents habitants-années est la plus importante en ACVA ou ACVC : la consommation d'eau, la santé humaine, l'épuisement des ressources abiotiques, les déchets radioactifs, l'énergie primaire et l'effet de serre.

Pour trois de ces indicateurs (déchets radioactifs, énergie primaire et eau utilisée), les comparaisons par ACVA ou ACVC entre les différents systèmes présentent un profil similaire, comme illustré à la Figure 77. Pour les deux approches, le système le plus performant semble être le gaz.

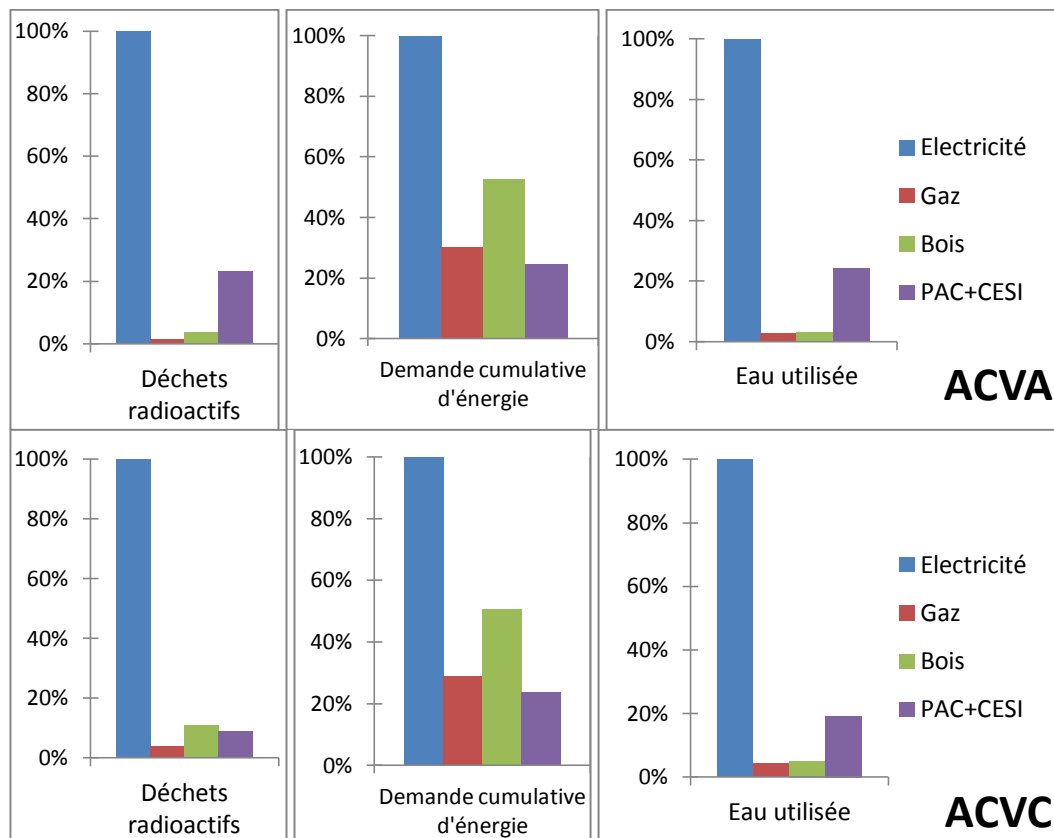


Figure 77 : Indicateurs au profil similaire en ACVA (haut) ou ACVC (bas) pour la comparaison des systèmes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire. Valeur des indicateurs exprimée par rapport à la variante électricité (= 100 %)

Les trois autres indicateurs (effet de serre, dommages à la santé et épuisement des ressources abiotiques) sont quant à eux fortement impactés par l'approche choisie, comme illustré à la Figure 78, qui présente les résultats normalisés par rapport à l'électricité. L'approche ACVA favorise l'utilisation de l'électricité (directement ou PAC+CESI) alors que l'ACVC favorise plutôt le bois (effet de serre, épuisement des ressources) ou le gaz (dommages à la santé). La production d'électricité marginale comporte une part importante de gaz et de charbon, ce qui augmente de façon considérable les impacts de l'électricité sur l'effet de serre et l'épuisement des ressources. *A contrario*, en ACVA la production d'électricité est majoritairement d'origine nucléaire.

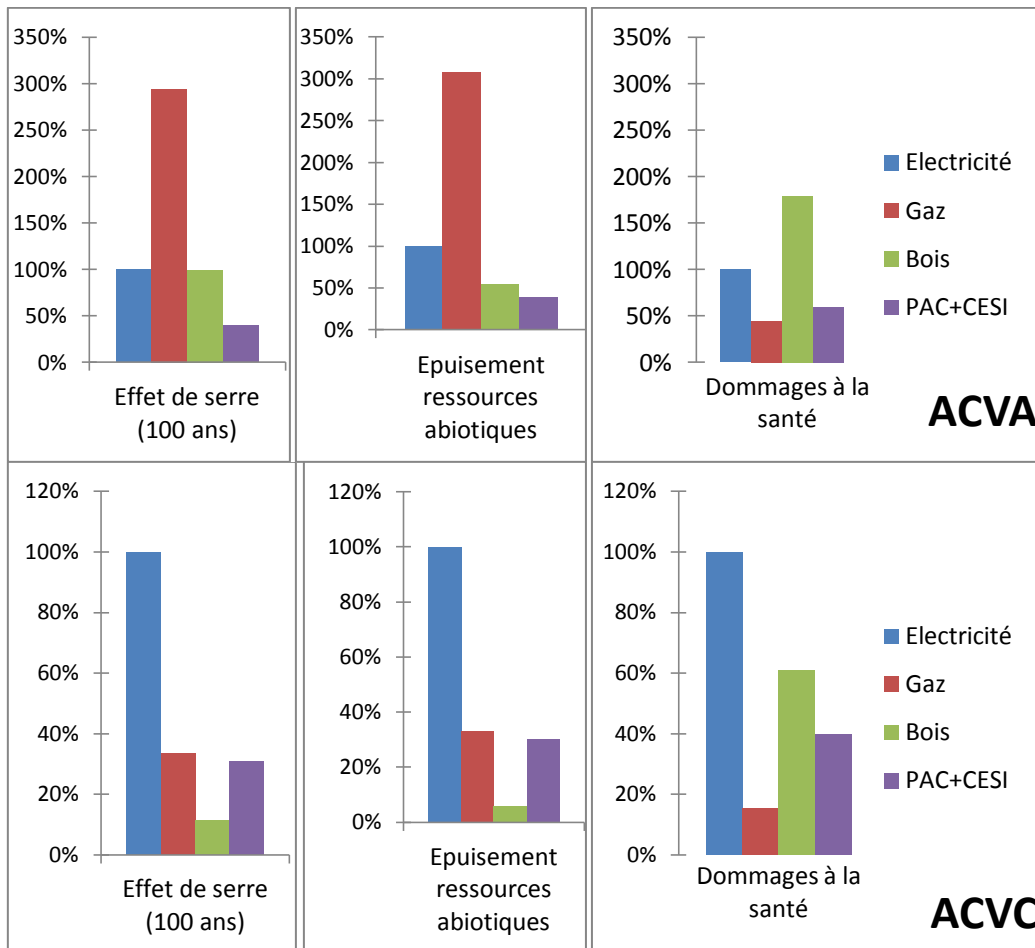


Figure 78 : Indicateurs fortement impactés par le choix de l'approche ACVA ou ACVC pour la comparaison des systèmes de chauffage. Valeur des indicateurs exprimée par rapport à la variante électricité (= 100)

3.5.7.4. PRODUCTION LOCALE D'ÉNERGIE

On considère la variante I-BB avec des systèmes de chauffage et d'eau chaude sanitaire électrique. L'objectif est ici de comparer différents systèmes de production locale d'énergie et leur impact sur le bilan environnemental du bâtiment en fonction de l'approche méthodologique considérée.

Pour l'approche attributionnelle comme conséquentielle, il est nécessaire d'effectuer un bilan horaire pour évaluer la quantité d'énergie autoconsommée et la quantité d'énergie envoyée vers le réseau électrique. Dans le cas de l'approche attributionnelle, on ne valorise pas l'export d'énergie. Cependant, l'allocation de la fabrication des systèmes de production d'énergie est faite au prorata de l'énergie consommée.

Pour l'approche conséquentielle, l'énergie exportée subit des pertes, contrairement à l'énergie autoconsommée. Le niveau de perte est fixé à 3,5 %.

ce qui correspond aux pertes techniques sur le réseau basse tension français⁷⁵. L'intégralité de la fabrication des systèmes de production est associée au projet.

Photovoltaïque

Une proportion importante de la production photovoltaïque est exportée vers le réseau : 65,9%. Le résultat des bilans environnementaux obtenus pour le système photovoltaïque de la maison INCAS est présenté à la Figure 79. Là encore, le choix de la méthode va avoir un impact important sur l'aide à la décision apportée. Dans le cas de l'ACVA, la mise en place d'un système photovoltaïque est défavorable pour une majorité d'indicateurs. *A contrario*, elle est favorable pour la totalité des indicateurs en approche ACVC.

Les différences observées sont principalement dues au mix technologique associé à la production d'électricité, majoritairement constitué de nucléaire dans le cas ACVA et majoritairement constitué de gaz et de charbon dans le cas ACVC.

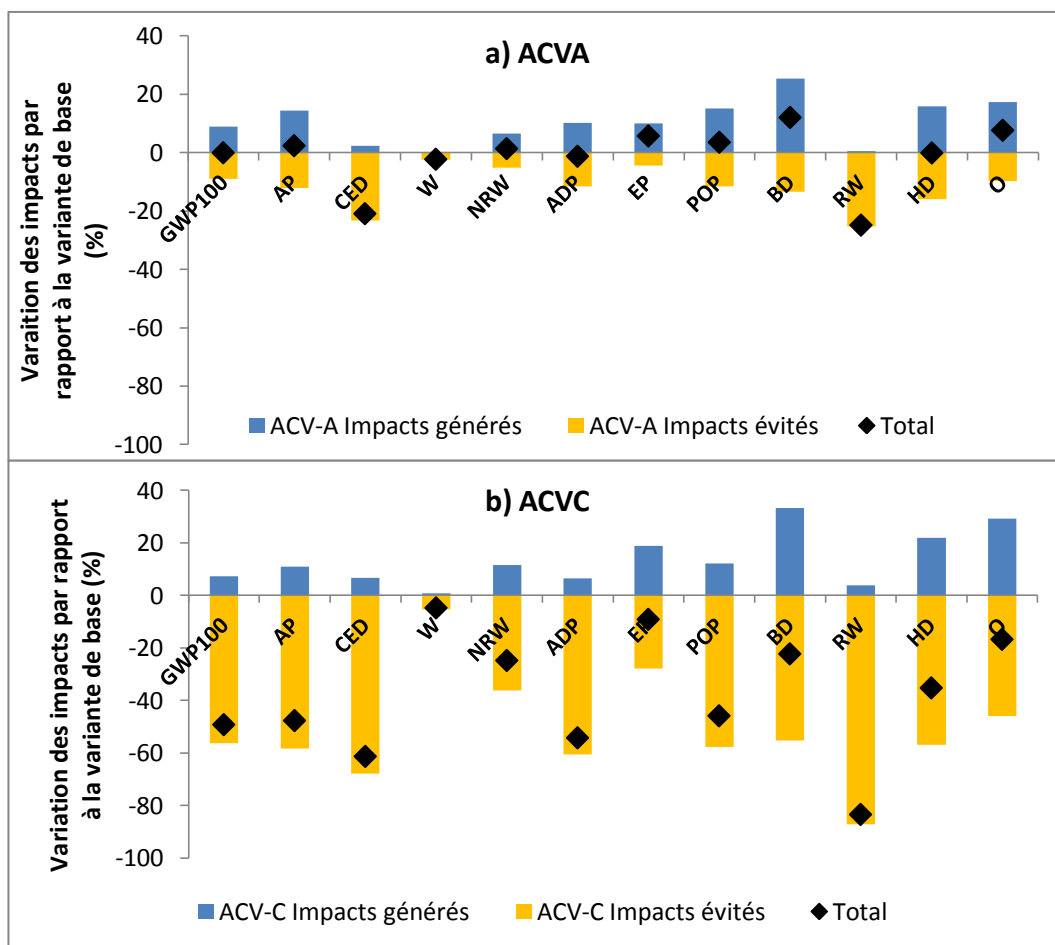


Figure 79 : Évaluation de l'intérêt environnemental du système de production d'électricité photovoltaïque par l'approche ACVA (en haut) ou ACVC (en bas)

⁷⁵ gtpe.cre.fr/media/documents/presentation_pertes_ERDF_PONS.pdf, p2

Système de production d'eau chaude solaire (CESI) avec appoint électrique

La fraction solaire du système est de 78 %. Les résultats du bilan environnemental sont donnés à la Figure 80. Le bénéfice environnemental du CESI correspond à la différence entre l'impact dû à la consommation d'électricité avec un ballon à accumulation électrique classique et l'impact de la consommation d'électricité avec le CESI.

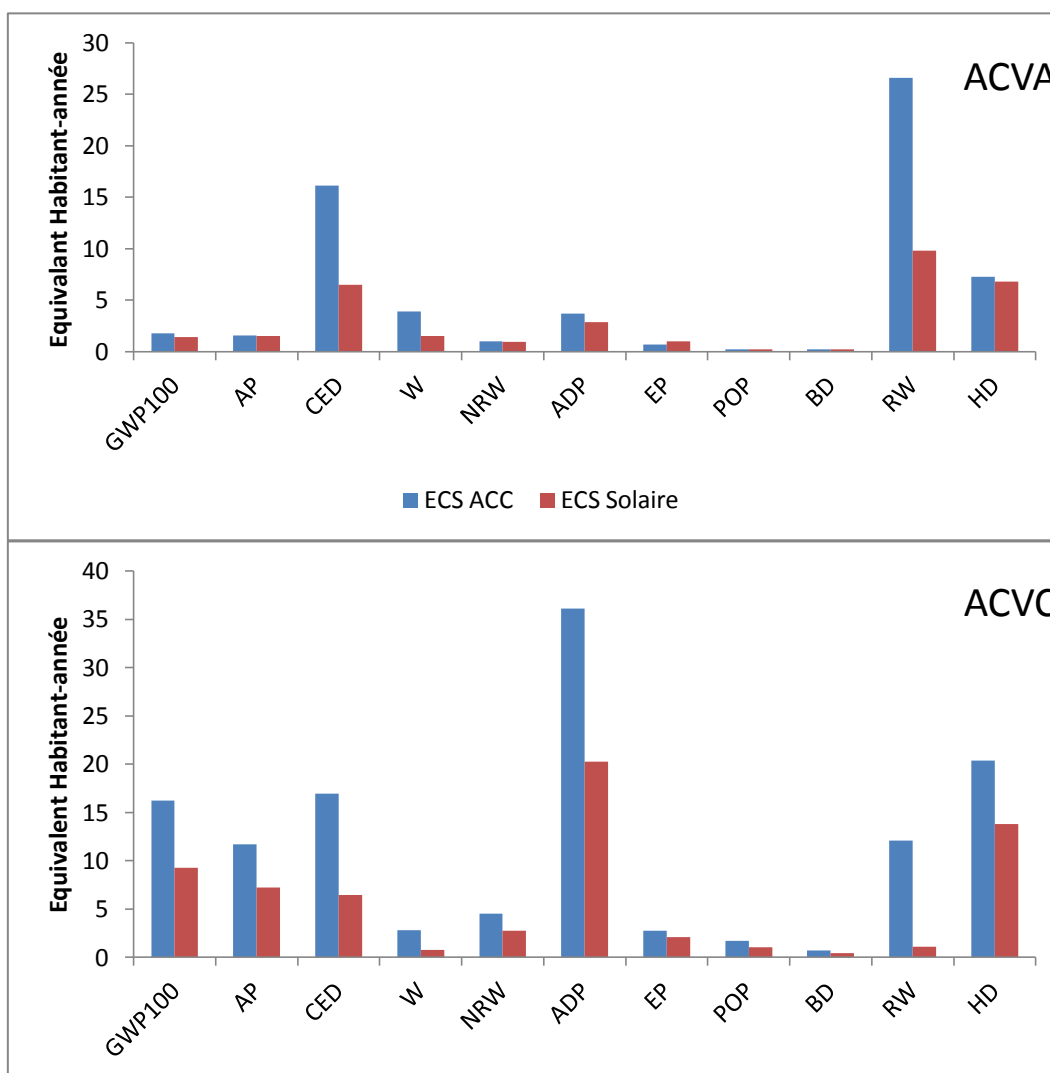


Figure 80 : Bilan environnemental de l'eau chaude solaire (production d'eau chaude+équipement), avec un ballon à accumulation électrique (ECS ACC) ou un système combiné solaire thermique et électricité (ECS solaire- CESI) en ACVA (haut) et ACVC (bas)

Les deux méthodes sont favorables au CESI (ECS solaire). L'amélioration du bilan grâce à l'installation du CESI est néanmoins beaucoup plus marquée en ACVC qu'en ACVA. Là encore, le mix électrique utilisé est la raison de la différence entre les deux évaluations.

Système de micro-cogénération bois

L'objectif principal du système est de fournir l'eau chaude et le chauffage pour l'habitation. La production d'électricité suit la demande en chauffage. L'estimation de la production de chaleur et d'électricité se fait en prenant pour modèle le procédé inclus dans la base ecoinvent v3 «*heat and power cogeneration, wood chips, 2000 kW, CH*». Il n'existe pas de procédé de micro cogénération bois dans cette base de donnée.

Pour ce procédé les performances suivantes sont indiquées : rendement thermique de 50 % et rendement électrique de 10 %. La production d'électricité est modélisée en fonction de la production de chaleur : pour chaque kWh de chaleur fournie, 0,2 kWh d'électricité sont produits.

A l'instar du système photovoltaïque, la production d'électricité est consommée directement par le bâtiment lorsqu'elle est concomitante à la consommation et exportée sur le réseau (avec pertes de 3,5 %) en cas de production excédentaire. Dans le cas de la cogénération, 97 % de la production d'électricité est autoconsommée. Le système produit seulement 807 kWh d'électricité par an et en exporte 24. La production du système est faible devant la quantité d'électricité spécifique consommée par la maison de 3224 kWh annuels.

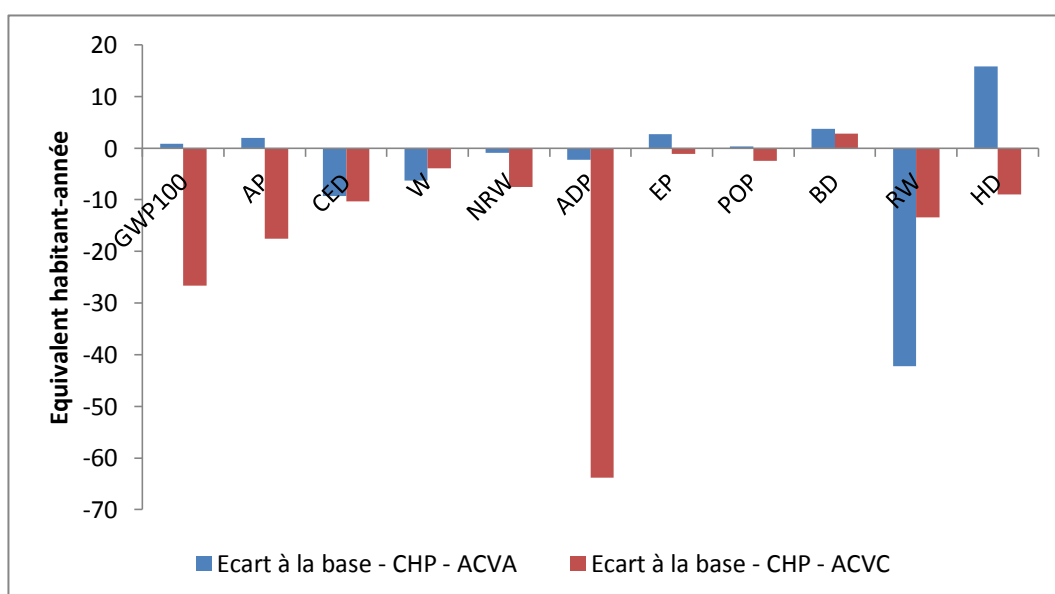


Figure 81 : Modification du bilan environnemental obtenu en passant du chauffage et ECS électrique à une cogénération bois (CHP), exprimée en équivalent-habitant année. Une valeur positive indique que la cogénération génère plus d'impact que l'électricité

L'utilisation du mix électrique marginal valorise la cogénération et défavorise l'utilisation d'électricité. La cogénération bois a un bilan environnemental plus favorable que l'électricité en ACVC (sauf pour l'indicateur de dommages à la

santé humaine, dont la valeur élevée pour le bois est liée à l'émission de particules fines). Le bilan est plus mitigé en ACVA.

3.5.7.5. ANALYSE D'INCERTITUDE SUR LE POTENTIEL DE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL DE L'ÉLECTRICITÉ

L'objectif du modèle de simulation de la production d'électricité est de « prévoir » pour une année-type actuelle (futur proche) quelle sera la production d'électricité à chaque heure de l'année. Outre le biais de modélisation (erreur due à la modélisation même qui ne peut simuler qu'une partie de la réalité), la production d'électricité est sensible à des données d'entrées incertaines.

L'objectif de ce paragraphe est de présenter les résultats d'une analyse de Monte-Carlo effectuée sur neuf paramètres incertains influençant de façon importante la production d'électricité : le niveau de consommation nationale, la température extérieure, la disponibilité des centrales nucléaires, la capacité nucléaire installée, les ressources hydrauliques disponibles, les capacités éoliennes et photovoltaïques installées, la capacité installée des centrales à charbon et la part de charbon dans la production fossile.

Après une courte description de la méthode de Monte-Carlo, les neuf paramètres sont présentés plus en détails. La dernière partie expose les résultats obtenus sur le mix moyen annuel et le mix marginal pour une demande constante sur l'année.

Méthode de Monte-Carlo

La méthode de Monte-Carlo permet de propager une incertitude sur des paramètres d'entrée à travers un modèle pour obtenir une incertitude sur la sortie du modèle. Les paramètres d'entrée étudiés doivent être indépendants. On leur associe une distribution de probabilité représentant l'incertitude qui est associée à leur valeur. Cette distribution de probabilité est soit construite à partir de données réelles soit à partir de dires d'experts. On réalise ensuite un grand nombre de tirages de paramètres afin de générer un des sets de paramètres d'entrée. La simulation de l'ensemble de ces sets permet de déterminer une distribution de probabilité sur une variable de sortie du modèle, par exemple le potentiel de réchauffement global par kWh associé au mix moyen. La méthode de Monte-Carlo est couramment utilisée en ACV (McCleese et LaPuma, 2002 ; Sonnemann et al., 2003 ; Peters, 2007).

Paramètres intégrés à l'analyse et distribution de probabilité associée

Le niveau de consommation nationale

L'incertitude sur le niveau de consommation nationale est représentée par une variation de la puissance de base (définissant les usages non thermosensibles). On considère une loi normale centrée sur la valeur de référence (46,1 GW) et d'écart-type de 500 MW, soit un peu plus de 1 % de la valeur de référence. Cela correspond à l'écart observé entre les prévisions de consommation annuelle totale faites par RTE et la consommation réelle.

La température extérieure

L'incertitude sur la météorologie est représentée uniquement par une incertitude sur la température extérieure. On choisit un modèle très simplifié pour évaluer l'ordre de grandeur lié à cette incertitude : la température nationale moyenne annuelle peut varier par rapport à la référence calculée. L'ensemble de la chronique horaire de température est translatée de la variation tirée aléatoirement. La variation est tirée selon une loi normale centrée d'écart-type de 0,25 °C. La température nationale moyenne de référence (telle que définie dans le chapitre 3)⁷⁶ en 2013 calculée par le modèle était de 12 °C, et celle de 2014 de 13,1 °C. L'indice de rigueur climatique de 2013 était de 1,06 (année légèrement plus froide que la moyenne des 30 dernières années) et celui de 2014 de 0,79 (plus chaude que la moyenne des 30 dernières années).

Disponibilité et capacité nucléaire

La chronique annuelle (au pas de temps journalier) de disponibilité nucléaire est tirée au sort parmi les chroniques de 2010 à 2014. La probabilité est équirépartie. Il existe une incertitude politique forte à court terme sur le parc nucléaire français concernant la fermeture probable de la centrale de Fessenheim et la mise en service de l'EPR de Flamanville. Deux capacités installées 61,4 et 63,1 GW sont considérées comme possibles dans un futur proche. Ces deux possibilités sont reprises du bilan prévisionnel 2015 établi par le gestionnaire du réseau électrique (RTE, 2015). On tire au sort de façon équiprobable la capacité nucléaire installée parmi ces deux possibilités.

Les ressources hydrauliques

La probabilité associée au niveau de ressources hydrauliques totales est représentée par une distribution de type normale d'espérance 66,7 TWh et d'écart-type 7,5 TWh. Les paramètres ont été identifiés sur les chroniques de 1981 à 2014. Le lien entre conditions climatiques et ressources hydrauliques est négligé car une relation simple ne peut être mise en évidence : il n'y a par exemple

⁷⁶ La température nationale de référence correspond à la moyenne des températures des huit stations de la réglementation thermique 2012 pondérée par un poids correspondant à leur contribution dans la consommation d'électricité.

aucune corrélation entre l'indice de rigueur climatique et la production hydraulique annuelle. Les ressources hydrauliques sont affectées à 66,3 % à l'hydraulique fatale et 33,7 % à l'hydraulique modulable.

Les capacités installées éoliennes et photovoltaïque

L'incertitude est représentée par une loi normale de moyenne égale à la capacité installée prévue pour 2016 : 11 GW pour l'éolien et 7 GW pour le photovoltaïque. L'écart-type est de 0,5 GW pour l'éolien et 0,25 GW pour le photovoltaïque (soit respectivement 4,5 et 3,6 % de la valeur moyenne). On tronque la distribution de probabilité en plaçant des bornes inférieures correspondant aux capacités installées actuelles (9,1 GW pour l'éolien et 5,2 GW pour le PV).

La capacité installée des centrales au charbon

La fermeture de plusieurs centrales au charbon est prévue dans un futur proche. L'incertitude sur la fermeture effective de ces centrales est représentée par une distribution normale de moyenne égale à la capacité installée prévue pour 2016 : 3 GW. Un écart-type de 0,5 GW est considéré et la distribution est tronquée sur sa borne supérieure à 4,2 GW, ce qui correspond à la capacité installée actuellement.

La part de charbon dans le groupe fossile centralisé

La part de charbon peut varier entre 0,3 et 0,7 selon une loi normale centrée en 0,6. La valeur moyenne est extraite de la moyenne historique observée sur les années 2010 à 2013. L'incertitude sur l'évolution des coûts marginaux de production gaz et charbon est représentée par la part de charbon dans la production centralisée d'origine fossile. Depuis un peu plus de trois ans, le coût marginal de production du charbon est plus faible que celui du gaz, mais la poursuite de cet état de fait est incertaine.

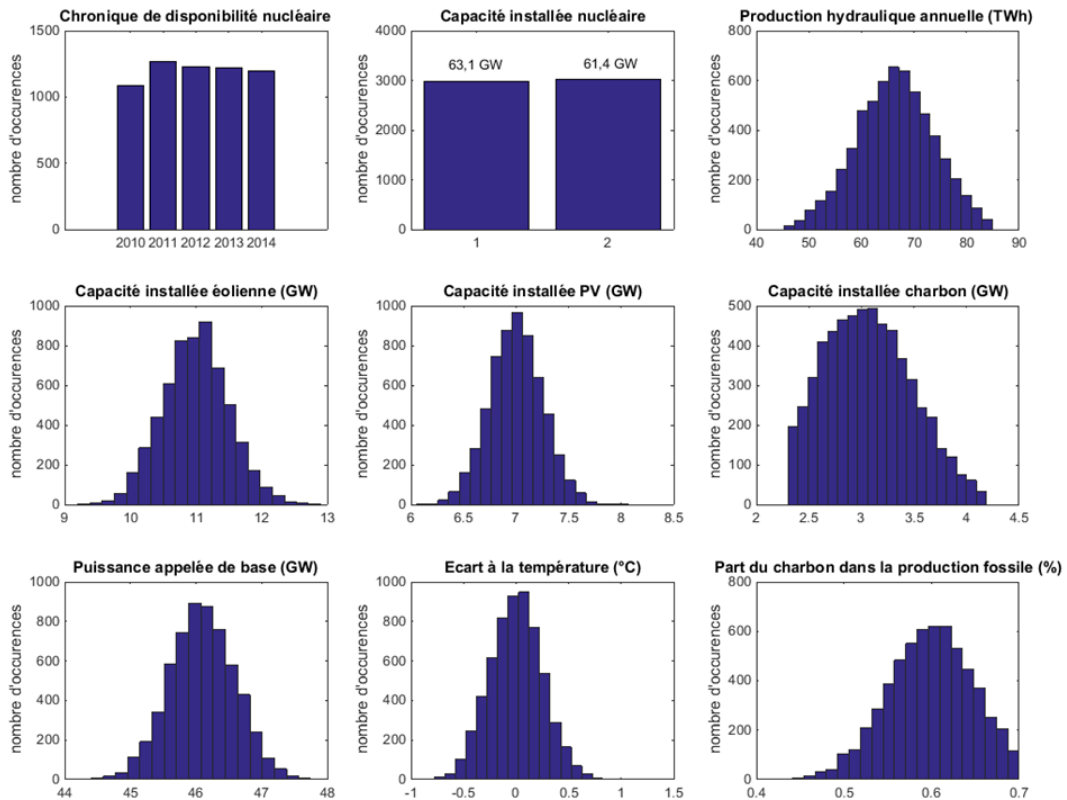


Figure 82 : Echantillonnage des paramètres d'entrée incertains pour 6000 tirages

Résultats

L'incertitude est évaluée sur chacun des 12 indicateurs, pour le mix annuel moyen et le mix marginal pour une demande de 1 MW constante. L'échantillonnage des paramètres est donné sur la Figure 82. Les ordonnées représentent le nombre d'occurrences de la valeur d'une variable. Les variables peuvent être discrètes (p. ex. Capacité nucléaire installée) ou continues (p. ex. Capacité éolienne ou solaire). Les résultats de la propagation des incertitudes à travers le modèle sont présentés sur la Figure 83 pour 1000 tirages.

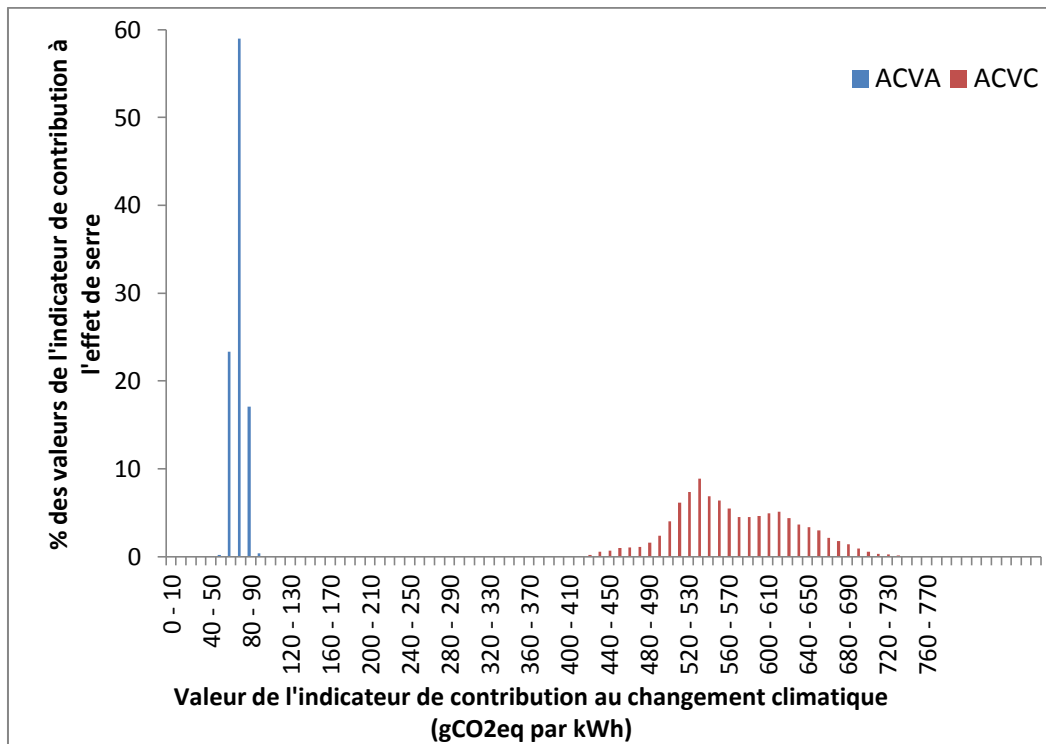


Figure 83 : Incertitude sur l'empreinte carbone par kWh du mix annuel moyen (ACVA) et du mix marginal pour une demande constante (ACVC), 6000 tirages

Le caractère non lisse de la distribution observée pour 6000 tirages est lié principalement au mélange entre variables discrètes et variables continues. Les chroniques de disponibilité nucléaire ont une forte influence sur les résultats et créent des effets de seuil. Elles expliquent les deux pics observés pour la distribution de l'effet de serre du kWh marginal. La Figure 84 montre la distribution de probabilité obtenue en fonction de la chronique historique de disponibilité nucléaire utilisée. Les chroniques de disponibilité sont bien à l'origine des deux pics principaux observés pour le kWh marginal sur la Figure 83.

Deux conclusions principales ressortent de l'analyse de Monte Carlo. Premièrement, l'incertitude sur le mix annuel moyen est relativement limitée et ne dépasse pas 10 % de la valeur moyenne. L'incertitude sur le mix marginal est bien plus importante avec des variations allant jusqu'à plus de 50 % de la valeur moyenne. Deuxièmement, les distributions d'incertitudes moyenne et marginale ne se recoupent pas : les incertitudes sur le modèle ne remettent pas en cause les différences de résultats entre les deux approches.

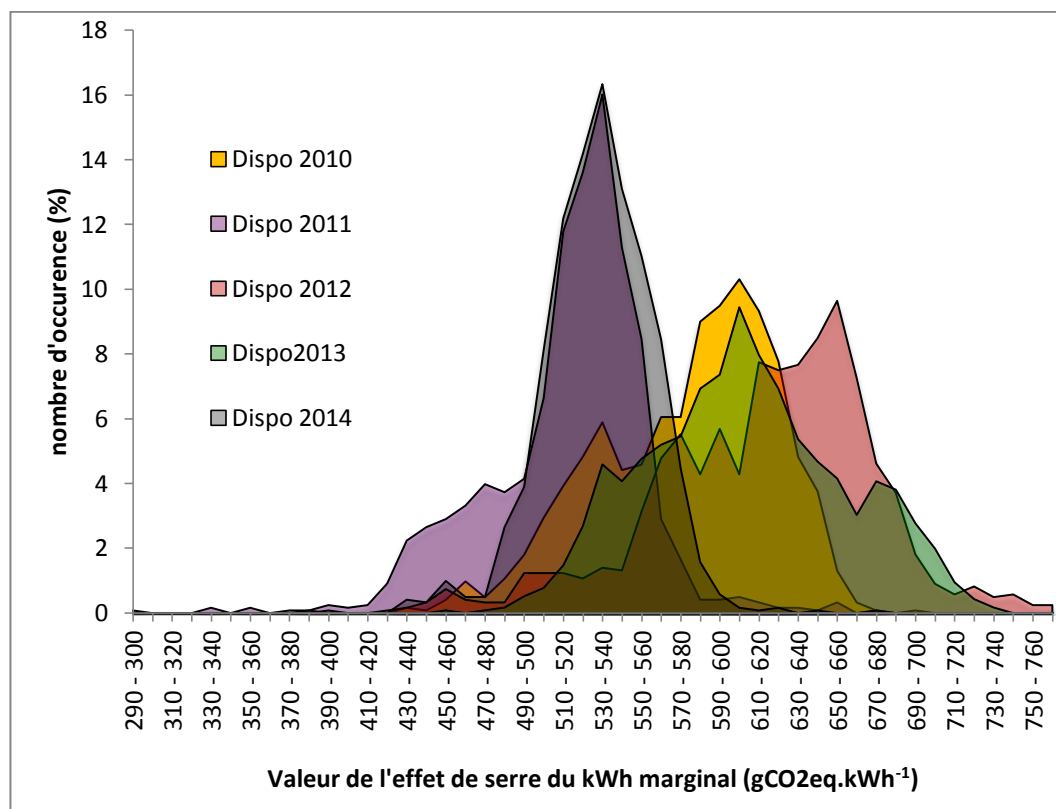


Figure 84 : Distribution de probabilité de l'empreinte carbone du kWh marginal en fonction de la chronique de disponibilité nucléaire (année 2010 à 2014)

3.5.7.6. SÉLECTION DE LA MÉTHODE ADAPTÉE

La méthode conséquentielle proposée est recommandée pour une utilisation en écoconception mais la méthode attributionnelle peut être utilisée pour d'autres objectifs, comme le suivi de l'évolution des émissions du secteur du bâtiment ou le suivi d'un parc de bâtiment.

La méthode conséquentielle est tournée vers le futur : elle permet d'évaluer l'efficacité environnementale d'une décision, même à petite échelle, alors que la méthode moyenne horaire permet plutôt de faire un bilan, une photo à un instant *t* du système observé. Cela peut être utilisé, par exemple, pour mettre en place un protocole de suivi de performance pour une stratégie d'action donnée.

Ainsi, dans le cas d'un plan de rénovation du parc bâti, à l'échelle nationale, il est possible d'effectuer une quantification des émissions qui devraient être évitées grâce à la mise en place de différentes politiques prévues en utilisant une approche conséquentielle. Dans un second temps, la réalisation des performances de la politique sélectionnée peut être réalisée de manière incrémentale avec une méthode attributionnelle dynamique.

La *nature* conséquentielle de l'objectif d'écoconception a été discutée dans le Chapitre 1. L'étude de cas proposée ici montre que la mise en place de

cette méthode est de nature à changer l'interprétation de l'étude ACV. Il est également important de sélectionner des hypothèses de modélisation cohérentes avec la nature de l'étude et cohérentes entre elles. Le risque d'incohérence entre hypothèses a été montré lorsqu'une méthode d'allocation conséquentielle (p. ex. la méthode de substitution ou impacts évités) est appliquée avec des données moyennes (mix horaire moyen) conduisant à des situations paradoxales (le photovoltaïque évite photovoltaïque, voir paragraphe 3.3.5).

Dans le cas où les données précises sur la production marginale ne sont pas disponibles (p. ex. informations sur la compétitivité des technologies) mais que des productions fatales peuvent être identifiables (p. ex. Photovoltaïque, utilisation de déchets, etc.) il est important a minima d'exclure ces technologies du mix de substitution lorsqu'on entreprend une démarche de modélisation conséquentielle. Cette procédure correspond au parti pris dans la base de donnéesecoinvent v3 conséquentielle long terme.

3.6. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

À partir du modèle présenté au Chapitre 2 et de l'état de l'art établi dans le Chapitre 1, deux approches d'évaluation environnementale des bâtiments ont été mises en place et testées sur une étude de cas simple : une approche attributionnelle et une approche conséquentielle.

Le cas de l'électricité a été développé de façon approfondie, avec l'établissement de deux méthodes originales d'évaluation des impacts environnementaux liés à la consommation d'électricité : une méthode attributionnelle dynamique et une méthode « marginale dérivée ». Ces méthodes s'appuient sur le modèle de simulation de l'équilibre offre-demande pour une année type, décrit dans le Chapitre 2. Une deuxième méthode marginale issue des recommandations du GHG Protocol a également été mise en place en utilisant ce modèle et peut être utilisée comme alternative lorsque le modèle de simulation du système électrique n'est pas utilisable (p. ex. non-linéarité, étude prospective long terme).

L'étude de cas présentée montre un effet important des méthodologies développées sur l'évaluation des bâtiments. Selon l'approche retenue, la meilleure variante, les meilleurs choix de conception peuvent être différents. La sélection d'une méthode adaptée aux objectifs de l'étude est donc nécessaire.

Les méthodes d'évaluation des usages électriques permettant de dériver des mix par type d'usage n'ont pas été étudiées dans ce chapitre. Les méthodes de mix par usage peuvent être vues comme une technique d'allocation particulière appliquée aux méthodes attributionnelles (Herfray, 2011a).

La principale limitation liée aux approches proposées est l'horizon temporel pris en compte. En effet, seul le court terme est considéré ici, or les choix faits au niveau de la construction ou de la réhabilitation d'un ensemble bâti vont affecter sa consommation durant plusieurs décennies. L'objectif du chapitre suivant est de proposer une méthodologie introduisant des éléments prospectifs, principalement sur le changement climatique et sur l'évolution du parc de production d'électricité.

Chapitre 4. Vers une approche prospective pour l'écoconception des ensembles bâtis

4.1. INTRODUCTION

4.1.1. Objectifs

Dans le cadre de l'utilisation de l'ACV comme outil d'aide à la décision en phase de conception, la problématique liée à la longue durée de vie des ensembles bâtis peut être formulée de la façon suivante : quelle variante de conception a le plus de chance d'être la plus performante (au sens de l'ACV) sur l'ensemble de la durée de vie du bâtiment, en tenant compte de l'évolution possible du système d'arrière-plan ? Une autre question pourrait être : quelle variante de conception participe le plus à la réalisation d'un futur souhaitable ? De plus, étant donné que le niveau de confort des occupants fait partie de l'unité fonctionnelle du bâtiment, il convient de se demander si le respect des critères de confort est assuré dans la durée.

L'approche prospective présentée ici définit un cadre méthodologique répondant à ces interrogations. Elle introduit dans l'évaluation du cycle de vie du projet étudié les évolutions possibles du système d'arrière-plan. La méthode retenue est le développement de scénarios descriptifs contrastés centrés sur deux déterminants : l'évolution du climat et l'évolution des systèmes énergétiques, en particulier le cas du réseau électrique.

Le choix des deux aspects sélectionnés a été justifié dans le Chapitre 1. Les paragraphes suivants proposent le développement de scénarios à partir de l'évolution des déterminants. Suivent deux propositions méthodologiques pour intégrer ces scénarios à l'ACV des bâtiments et des quartiers, selon une approche attributionnelle (ACVA) ou une approche conséquentielle (ACVC). Un cas d'application simple est décrit pour illustrer les apports de l'approche proposée. Un dernier paragraphe revient sur les limites de la méthodologie et les perspectives de recherche.

4.1.2. Orientations générales et positionnement du cadre d'étude

Sur la base des connaissances recueillies sur les deux déterminants présentés au Chapitre 1, il est possible d'envisager de nombreux scénarios :

- Le dernier rapport du GIEC présente 4 trajectoires d'émission de gaz à effet de serre mondiale, avec pour conséquence un forçage radiatif de $+2,6 \text{ W/m}^2$ à $+8,5 \text{ W/m}^2$ sur la période 2000-2100 (Vuuren et al., 2011).

- Les modèles de prospective énergétique tels que ceux présentés dans le Chapitre 1 peuvent générer des scénarios de nature très différente, selon leur type et les données utilisées :
 - o Scénario normatif ou « *backcasting* » : le point d'arrivé est fixé et on cherche la trajectoire optimale permettant d'y arriver (p. ex. scénarios 100 % énergie renouvelable, facteur 4, etc.).
 - o Scénario descriptif d'évolution sociétale, de possibilité de démocratisation d'innovation (p. ex. véhicules électriques, sensibilité à l'environnement).
 - o Simulation des effets de politiques publiques ou économiques : simulation de l'application de politiques publiques sur l'offre (p. ex. contrat d'achat préférentiel pour les énergies renouvelables) ou la demande (p. ex. incitation à la rénovation thermique), internalisation des externalités (p. ex. principe pollueur payeur, évolution du prix de la tonne de carbone sur le marché européen).

Le but de l'introduction de la prospective dans l'analyse de cycle de vie des bâtiments et des quartiers est de renforcer la qualité de l'aide à la décision apportée. La faisabilité d'un objectif comme l'atteinte du facteur 4 ou la faisabilité d'un mix électrique 100 % renouvelable ne sont donc pas traitées. L'utilisation de scénarios de transitions volontaristes (normatifs ambitieux par exemple) peut conduire à des paradoxes. Par exemple, les impacts futurs d'un mix électrique 100 % renouvelable seront probablement faibles, sauf concernant l'utilisation de ressources minérales (Berrill et al., 2016). L'utilisation de l'électricité sera donc peu contributive dans l'évaluation environnementale et pourra sembler être un levier important de réduction des impacts à l'échelle du bâtiment (préférence d'utilisation de l'électricité par rapport au gaz, ou au bois par exemple). « Sembler » seulement, car dans les scénarios 100 % renouvelable, pour le mix électrique en particulier, la demande en électricité doit rester faible et décroître en volume sur le long terme ; c'est une condition importante de faisabilité de ces scénarios⁷⁷. On peut alors se retrouver dans une situation paradoxale où la consommation d'électricité augmente dans un cadre normatif qui doit la faire diminuer pour être réalisable. Les scénarios normatifs ne sont donc pas appropriés dans le cadre d'étude de l'écoconception des ensembles bâtis.

Les évolutions sociétales comme l'introduction de nouveaux usages (p. ex. développement du véhicule électrique) ou le changement des comportements (p. ex. économie participative, sensibilité à l'environnement) sont également hors

⁷⁷ À titre d'exemple, l'exercice de prospective de l'ADEME « Vision 2050 » considère une baisse de la consommation d'électricité de plus de 40 % en 2050 ; une baisse de plus de 25 % par rapport à 2010 est prévue dans le scénario Négawatt (une division par 2 des besoins énergétiques du secteur résidentiel-tertiaire est prévue par ailleurs dans ce scénario).

du cadre de cette thèse. Ils impliquent un développement de connaissances poussées sur des facteurs sociologiques et économiques complexes. L'intégration de ces scénarios est une perspective de recherche transdisciplinaire intéressante mais ce thème n'a pu être abordé. L'utilisation des outils de modélisation prospective permet de dégager des tendances, d'analyser les risques potentiels d'une décision ou d'une absence de décision. Cependant, multiplier les paramètres variables dans ces outils dilue l'information qu'ils prodiguent et rend complexe l'analyse des résultats (Pesonen et al., 2000).

Dans un premier temps, un cadre d'analyse simple a donc été développé, sur la base de deux scénarios contrastés de réchauffement climatique et de deux scénarios d'évolution du système électrique en fonction du prix de la tonne de carbone sur le marché des quotas européen. Le prix du carbone n'impose aucune condition «*a priori*» sur la consommation nationale d'électricité ou sur la performance énergétique ou environnementale des ensembles bâtis. Dans ce cadre, l'analyse prospective peut être utilisée pour répondre aux objectifs posés et notamment quelle variante de conception participe le plus à la réalisation d'un futur souhaitable. La contextualisation des scénarios est présentée à la Figure 85. Le chiffre du scénario concerne son évolution climatique : 1 pour un scénario à fortes émissions et 2 pour un scénario à émissions contenues. La lettre du scénario concerne les efforts déployés en France, A pour un scénario avec un prix du carbone faible, B pour un prix du carbone fort (mise en place d'une taxe carbone en France).

L'approche générale est schématisée sur la Figure 86: on évalue premièrement le projet de bâtiment ou de quartier dans le cadre actuel (météorologie-type actuelle et caractéristiques de l'arrière-plan actuel) puis on évalue le projet à moyen puis à long terme, en tenant compte des évolutions climatiques et technologiques. Les caractéristiques des scénarios sont exposées plus en détails dans les paragraphes suivants.

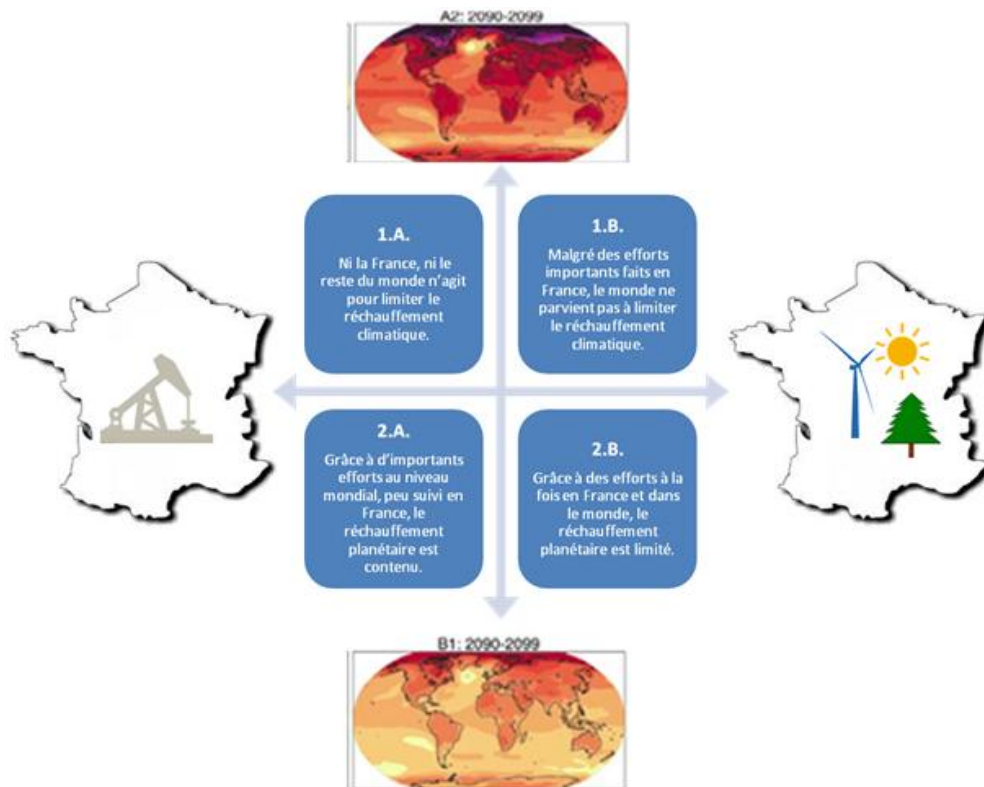


Figure 85 : Contextualisation des quatre orientations possibles pour les scénarios d'évolution de l'arrière-plan

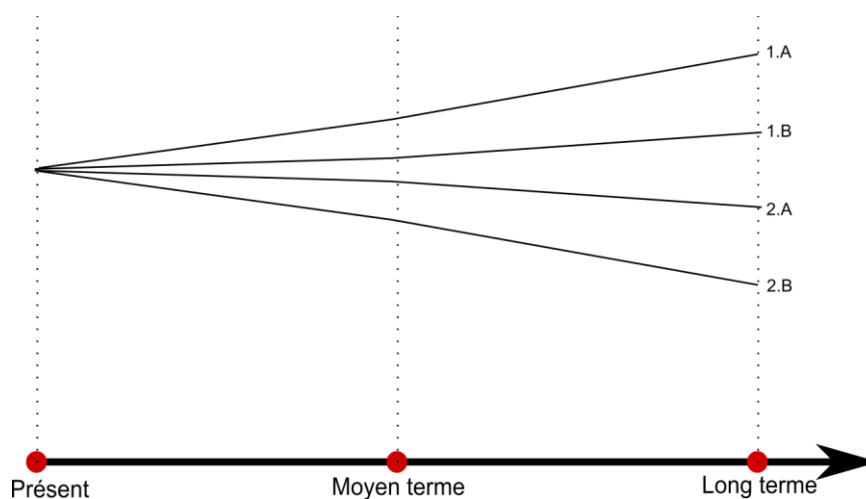


Figure 86 : Évaluation du projet à différents horizons temporels

4.2. ÉVOLUTION CLIMATIQUE

4.2.1. Introduction

Le GIEC a développé dans son dernier rapport quatre scénarios d'évolution du climat allant jusqu'à 2250 présentés dans la Figure 87. Les scénarios RCP, pour « *Representative Concentration Pathways* » sont associés à un chiffre qui représente le forçage radiatif en $W.m^{-2}$ attendu à l'horizon 2100. Le scénario RCP 8.5 correspond à une absence d'efforts internationaux pour réduire les émissions de GES. Le scénario RCP 2.6 correspond à un scénario volontariste visant à contenir le réchauffement planétaire en dessous de 2 °C. Certains chercheurs sont déjà sceptiques quant à la faisabilité de ce scénario au vu du temps restant pour le mettre en place et des contraintes démographiques et énergétiques existantes (Jones et Warner, 2016). Les scénarios RCP 4.5 et 6.0 sont intermédiaires et conduisent à une stabilisation du réchauffement à l'horizon 2150.

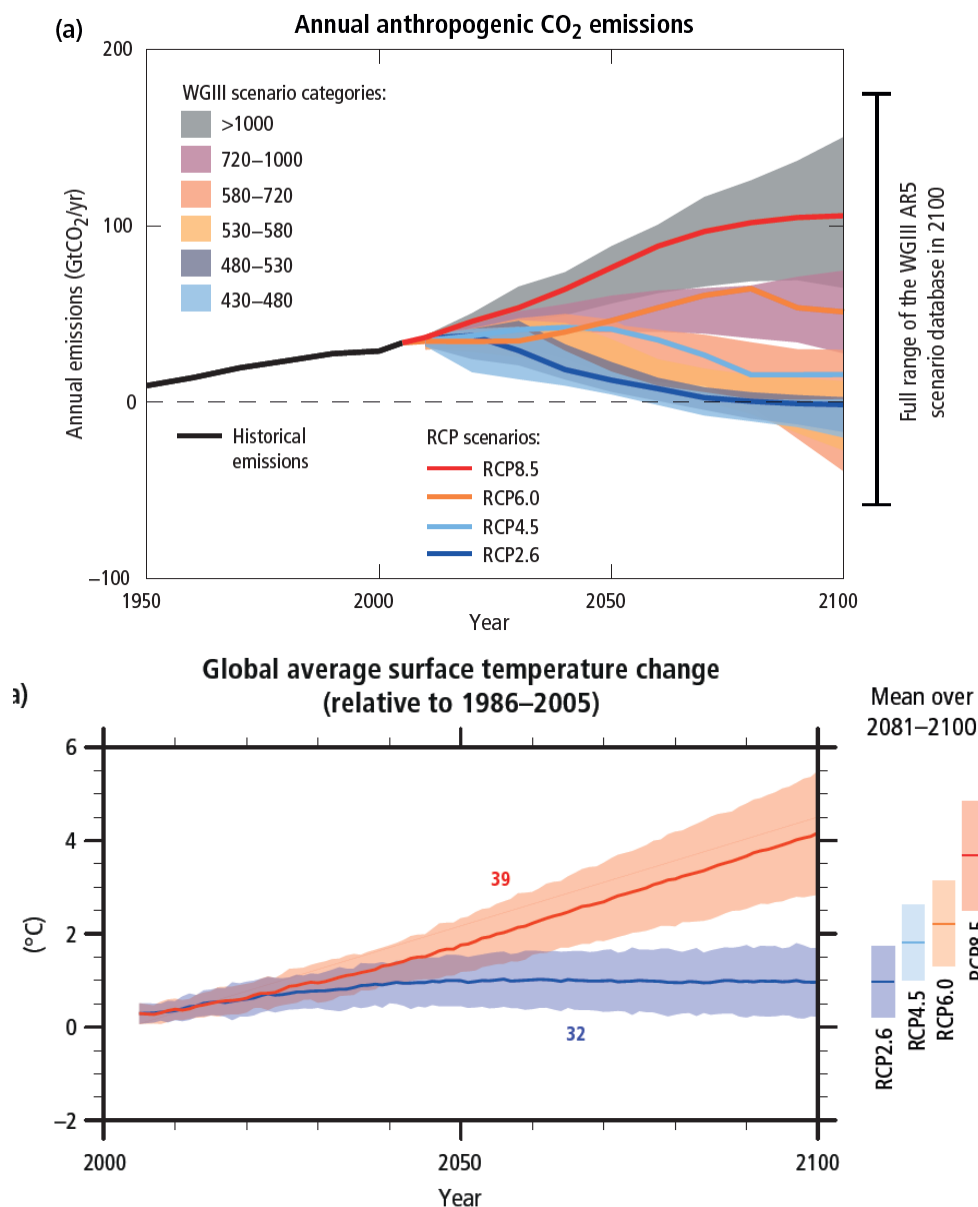


Figure 87 : Évolution des émissions de dioxyde de carbone anthropogénique (haut) et augmentation de la température moyenne de la terre (bas) pour les scénarios RCP (Allen et al., 2014)

Les scénarios RCP ont été régionalisés à l'échelle de la France (Ouzeau et al., 2014). A l'horizon 2071-2100, les deux scénarios extrêmes (RCP 2.6 et RCP 8.5) divergent fortement.

Les écarts entre les différents scénarios sont donnés dans la Figure 88 pour les températures. Elle présente les températures moyennes nationales simulées par le modèle de Météo-France Aladin-Climat pour trois scénarios RCP (2.6, 4.5 et 8.5).

On constate que les évolutions à l'horizon 2021 - 2050 sont proches pour les trois scénarios. En revanche, la fin du siècle est beaucoup plus contrastée : de

l'ordre de 4 °C de différence entre RCP2.6 et RCP 8.5 en été. On remarque également une différence importante entre l'été et l'hiver : les modèles prévoient une augmentation des températures beaucoup plus importante en été qu'en hiver.

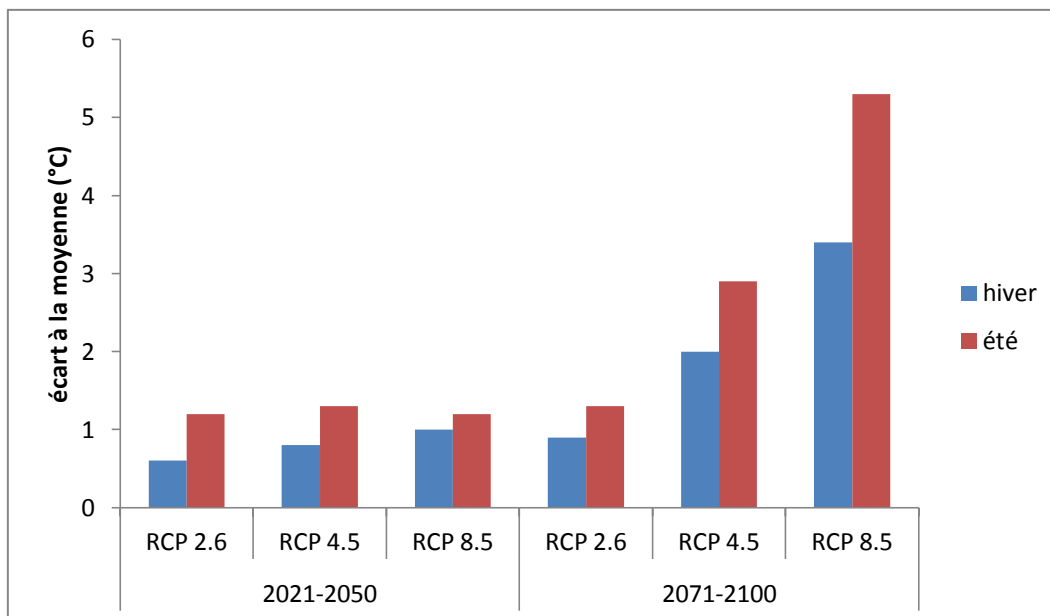


Figure 88 : Écarts de température par rapport à la moyenne de référence 1976-2005, pour le modèle Aladin-Climat et les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5, en moyenne estivale et hivernale aux horizons 2021-2050 et 2071-2100 (Ouzeau et al., 2014)

4.2.2. Développement des scénarios climatiques

4.2.2.1. HYPOTHÈSES PRÉLIMINAIRES

Une variation future du climat peut avoir plusieurs impacts sur le cycle de vie de l'ensemble bâti étudié, notamment :

- Les besoins de chauffage et de climatisation du bâtiment seront affectés (ADEME, 2010b).
- La température d'eau froide peut changer, ce qui influence les besoins d'énergie pour l'ECS. Cela va dépendre aussi de la provenance de l'eau (p. ex. eau de surface, nappe phréatique).
- Le comportement du système électrique peut être affecté (Bouckaert et al., 2014)
- La consommation d'eau potable peut également être impactée (p. ex. canicules fréquentes).

Le climat futur va modifier la consommation d'énergie dans les bâtiments. Afin de modéliser cet effet, on pose les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Une simulation thermique dynamique du projet étudié en climat actuel et une autre en climat futur doivent être effectuées pour déterminer l'évolution des besoins de chauffage et de climatisation.
- L'évolution de la température d'eau froide est négligée.
- L'influence du réchauffement climatique sur le fonctionnement du système électrique est négligée (une discussion sur ce thème est présentée au paragraphe 4.2.3).

L'étude du comportement thermique dynamique des bâtiments permettant de déterminer précisément les besoins de chauffage, de climatisation et le respect de critères de confort nécessite l'utilisation de données climatiques au pas de temps horaire.

4.2.2.2. MODÉLISATION HORAIRE DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES FUTURES

La réalisation d'années météorologiques types au pas de temps horaire est généralement basée sur l'observation de séries longues de données météorologiques pour une station donnée. La norme NF-EN-ISO 15927-4⁷⁸ impose un nombre minimal de 10 ans de données et propose une procédure basée sur la reconnaissance de « mois types ». Cette norme a été utilisée pour produire les données météorologiques conventionnelles utilisées dans la réglementation thermique RT2012, sur la base des observations des années 1994 à 2008.

Pour produire des années météorologiques types futures, il est possible d'utiliser des projections climatiques complexes recréant des séries longues puis de reconstituer une année type à partir de la série longue obtenue. Il est possible également d'utiliser des techniques dites de « *morphing* », qui sont appliquées à une météorologie-type existante pour lui « *faire prendre* » les caractéristiques de la météorologie future.

Création de séries longues par les modèles climatiques

De récents travaux de Météo-France ont permis de réaliser des séries longues (30 ans) de simulation horaire du climat futur. Ces données intègrent la variabilité climatique interannuelle. La méthodologie, exposée dans (Hidalgo et al., 2014) est basée sur une méthode statistique de *clustering* et permet de recomposer des variations climatiques horaires à partir de jours « types ». Cette méthode a été testée pour deux stations françaises : Blagnac (Sud de la France, à côté de Toulouse) et Chartres (Nord de la France, proche de Paris). Les séries climatiques longues passées (1961-1991) et futures (2071-2100) modélisées pour la station de Chartres nous ont été transmises par Aude Lemonsu de Météo-France. Le

⁷⁸ Performance hygrothermique des bâtiments, Calcul et présentation des données climatiques, Données horaires pour l'évaluation du besoin énergétique annuel de chauffage et de refroidissement.

scénario d'évolution du forçage radiatif modélisé correspond au scénario médian SRES A1B issu du 4ème rapport du GIEC. Il est proche du scénario RCP 4.5. Le modèle climatique planétaire utilisé dans les données représentées à la Figure 89 est ECHAM5 r3, de l'institut Max Planck⁷⁹. Il a été couplé au modèle régional REMO développé par l'équipe de Daniela Jacob⁸⁰ pour obtenir les données journalières de variations climatiques en climat futur.

Les séries horaires de température et de rayonnement solaire type correspondant au climat passé (1961-1991) et futur (2071-2100) pour la station de Chartres ont été reconstituées selon la norme NF-EN-ISO 15927-4. La Figure 89 ci-dessous présente les résultats obtenus pour les températures.

La moyenne annuelle pour le climat passé de la station de Chartres est de 9,8 °C contre 13,0 °C en climat futur. L'augmentation de la température sur la saison de chauffe (octobre à avril) est de 2,9 °C contre 3,3 pour les mois de mai à septembre. Les écarts entre été et hiver ne sont pas aussi forts que prévu dans les dernières projections du GIEC (Ouzeau et al., 2014).

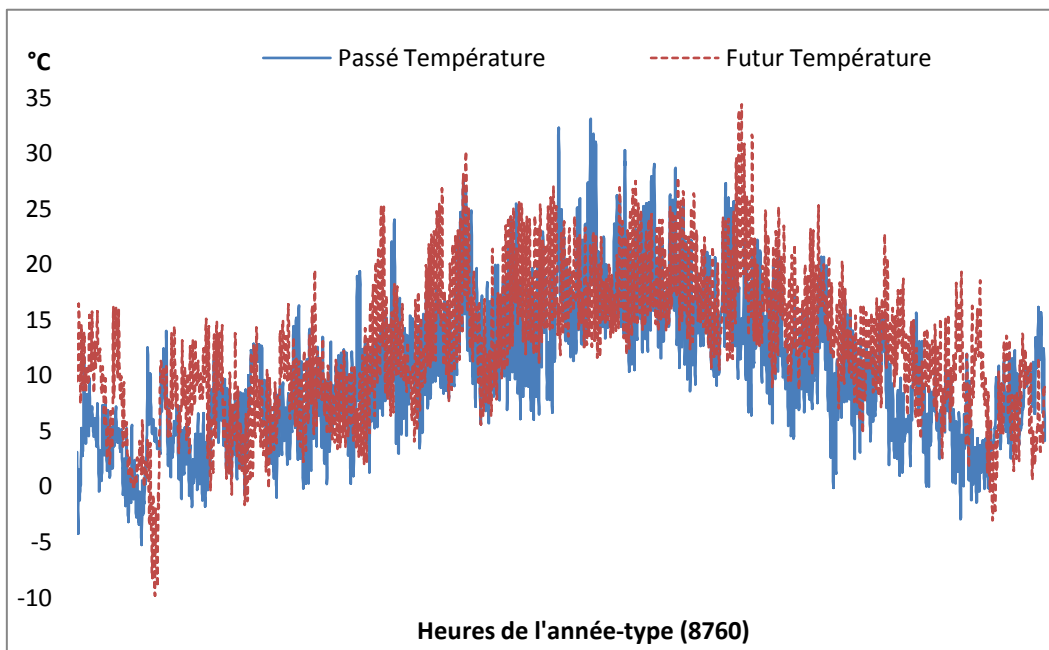


Figure 89 : Séries horaires de températures, Station Chartres, en climat passé (bleu) et futur (rouge)

Cette méthode est la plus complète : elle permet de tenir compte de la variabilité interannuelle et l'ensemble des données climatiques futures sont recrées dans un cadre cohérent. Il est également possible d'extraire des années particulièrement chaudes ou froides pour des études de sensibilité. Toutefois,

⁷⁹ http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/models/echam/mpi_report_349.pdf , accédé en juillet 2015

⁸⁰ <http://www.remo-rcm.de/> , accédé en juillet 2015

plusieurs limitations restreignent la possibilité d'utiliser ces données dans cette thèse :

- Une seule station est disponible actuellement (Chartres), ce qui empêche de tenir compte des disparités régionales qui seront vraisemblablement marquées à long terme, comme le montre la Figure 90.
- Un seul scénario climatique est pour l'instant disponible, ce qui limite les possibilités d'études de sensibilité sur ce thème précis. De plus, le scénario disponible ne correspond pas aux travaux les plus récents du GIEC.
- Une variabilité importante existe entre les différents modèles climatiques disponibles (planétaires puis régionaux) ce qui complique l'analyse des données et notamment l'analyse de la fiabilité et de l'incertitude des données obtenues.

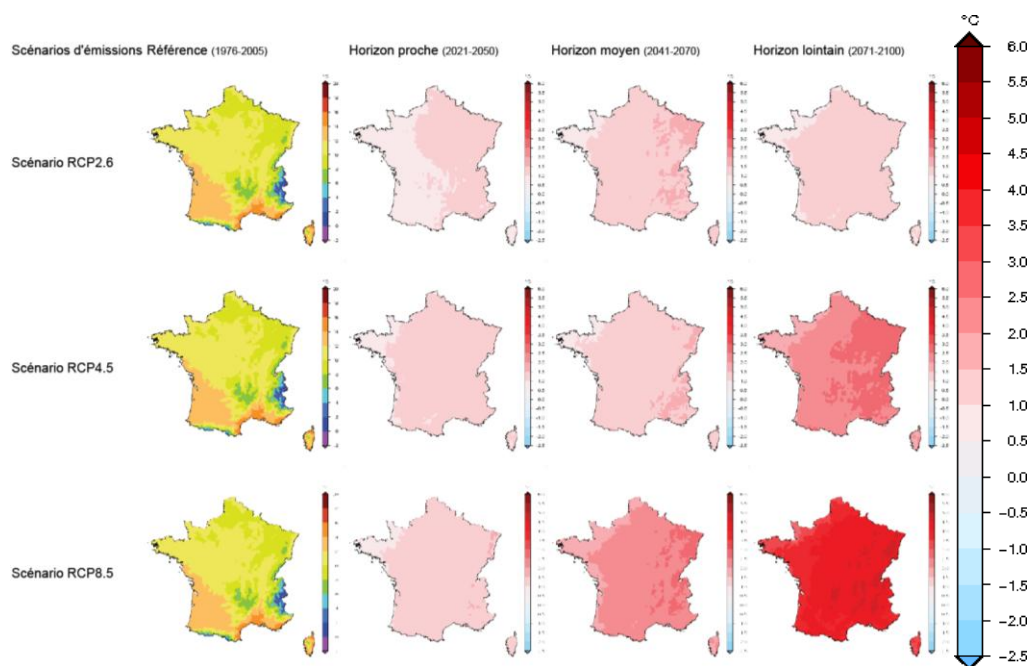


Figure 90 : Anomalie de température moyenne quotidienne (moyenne annuelle) : écart entre la période considérée et la période de référence (°C), Météo-France/CNRM2014 : modèle Aladin de Météo-France, source : DRIAS⁸¹

Méthodes de morphing

Plusieurs travaux de la littérature scientifique mentionnent les méthodes de *morphing* afin de produire des données météorologiques pour la simulation thermique dynamique des bâtiments (Chan, 2011 ; Guan, 2009). La technique la plus utilisée provient des travaux de Belcher et al. (2005). Il s'agit d'utiliser les résultats des simulations climatiques pour « déformer » les données météorologiques types.

⁸¹ <http://drias-climat.fr/decouverte/parcours/neo/vignettes/temperature>

Trois transformations peuvent être appliquées, selon la nature de la variable météorologique à modéliser :

- La translation : décalage des données pour les réajuster à la moyenne mensuelle future projetée

$$x = x_0 + \Delta x_m \quad 4-1$$

où Δx_m est la variation absolue de la moyenne mensuelle de la variable x pour le mois m .

- L'étirement linéaire : multiplication des données par un facteur correctif

$$x = \alpha_m \times x_0 \quad 4-2$$

où α_m est le changement fractionnel de la moyenne mensuelle pour le mois m . Pour calculer ce facteur pour la température d'air, on calcule le rapport des écarts entre la moyenne des températures maximales journalières ($\overline{T_{p_{max}}}$ pour le présent et $\overline{T_{f_{max}}}$ pour le futur) et la moyenne des températures minimales journalières ($\overline{T_{p_{min}}}$ pour le présent et $\overline{T_{f_{min}}}$ pour le futur) pour le mois considéré, soit :

$$\alpha_m = \frac{\overline{T_{f_{max}}} - \overline{T_{f_{min}}}}{\overline{T_{p_{max}}} - \overline{T_{p_{min}}}} \quad 4-3$$

- Une combinaison de translation et d'étirement linéaire:

$$x = x_0 + \Delta x_m + \alpha_m \times (x_0 - \langle x_0 \rangle_m) \quad 4-4$$

où $\langle x_0 \rangle_m$ est la moyenne mensuelle de la variable initiale

Ces travaux ont été utilisés de nombreuses fois pour produire des données météorologiques futures pour l'étude des bâtiments (Jentsch et al., 2008 ; Guan, 2009 ; Chan, 2011).

Cette méthode a été retenue dans le cadre de cette thèse pour les raisons suivantes :

- Une assurance de l'adéquation (en moyenne) entre les scénarios climatiques et les données météorologiques modélisées. Par exemple, la température moyenne estivale des données transformées correspond aux projections du GIEC par construction.
- Une très bonne couverture géographique : des données sont disponibles pour toute la France métropolitaine. L'ensemble des stations RT2012 peut donc être transformé.
- La possibilité d'utiliser différents scénarios et différents horizons temporels pour des analyses de sensibilité.

Les données disponibles pour les séries climatiques à l'horizon 2071-2100 ont été extraites du site de la DRIAS⁸². Sur ce site, les données de pluviométrie et de température sont disponibles mais les données de rayonnement et de vitesse de vent ne le sont pas. Seules les données de températures ont donc été transformées dans le cadre de cette thèse.

Un exemple de l'application du *morphing* à la température pour la station de Trappes (RT2012) transformée pour le scénario RCP 4.5 à horizon 2071-2100 est présenté ci-dessous (Figure 91). *te0* représente la température initiale, issue des données RT2012 pour la station de Trappes, *t_{ef}* représente la série temporelle de température une fois la procédure de *morphing* appliquée. La moyenne glissante sur la semaine pour *te0* et *t_{ef}* est également représentée (168 Moy. mobile sur pér.).

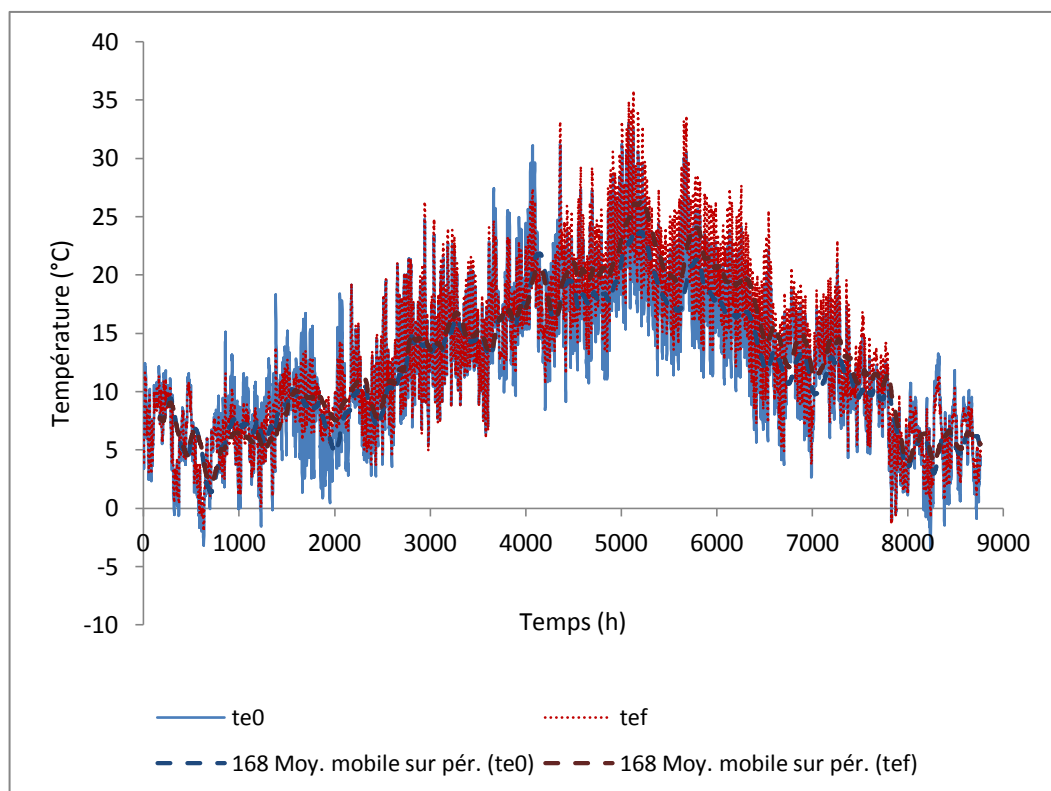


Figure 91 : Morphing appliqué à la station de Trappes, scénarios RCP4.5, horizon 2071-2100.

4.2.2.3. UTILISATION DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES FUTURES

Les données météorologiques futures obtenues par *morphing* permettent de constituer un set de météorologies-types équivalentes aux zones RT2012 mais projetées dans le futur.

⁸² <http://drias-climat.fr/>

Chaque projet concernant un ensemble bâti peut alors être simulé dans le présent en utilisant la station RT2012 qui lui correspond puis dans le futur en utilisant cette même station RT modifiée par *morphing*.

Par rapport aux orientations générales des scénarios, on fait correspondre en pratique les données suivantes :

- À « moyen terme », l'évolution climatique est négligée : en effet, celle-ci est très similaire pour l'ensemble des projections climatiques effectuées par le GIEC. Tous les scénarios prévoient une augmentation moyenne de la température de l'ordre de 1 °C par rapport aux données climatiques de 1976 à 2005. Un réchauffement des températures de l'ordre de 0,5 °C est déjà visible en comparant les données de la RT2005 et les données de la RT2012.
- À « long terme » (2071-2100), on considère deux possibilités : un changement climatique « contenu » par rapport aux données de la RT2012 (correspondant à un scénario type RCP 4.5 avec stabilisation des émissions de gaz à effet de serre) et un changement climatique « fort » correspondant au scénario RCP 8.5 du GIEC.

Les données météorologiques utilisées par scénarios et par horizon temporel sont résumées schématiquement à la Figure 92.

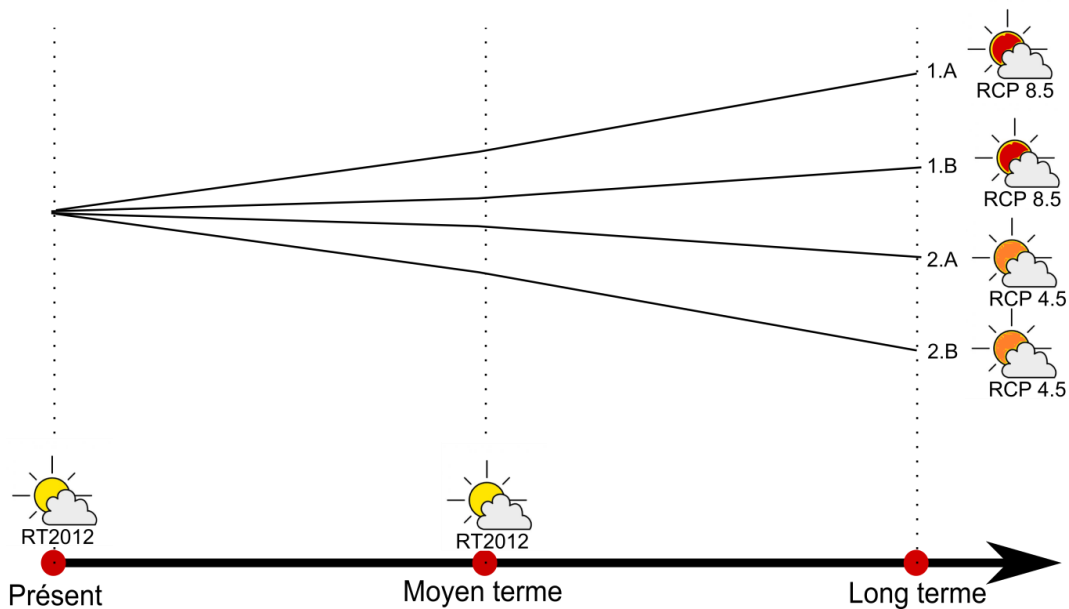


Figure 92: Données météorologiques pour les différents scénarios

4.2.3. **Ordre de grandeur des impacts du réchauffement climatique sur le système électrique**

L'impact des évolutions climatiques sur les systèmes de production d'énergie a été négligé car ces paramètres ne sont pas modélisables dans le modèle de prospective énergétique utilisé.

Concernant la production éolienne et photovoltaïque, peu d'études existent aujourd'hui et leurs conclusions sont parfois contradictoires. Une étude récente de Pryor et Barthelmie (2010) conclut à un effet probable négligeable du changement climatique sur la production éolienne en Europe du Nord. Wachsmuth et al. (2013) montrent *a contrario* une possible augmentation de la production en hiver en Allemagne. Koletsis et al. (2016) prévoient eux une diminution pour l'éolien offshore dans la mer noire et la mer méditerranée. La revue scientifique de Pryor et Barthelmie souligne par ailleurs les limitations importantes liées à la modélisation du vent en climat futur.

Le changement climatique affecte la quantité de vapeur d'eau atmosphérique et donc la nébulosité, ce qui peut avoir des conséquences pour la production solaire. Huber et al. (2016) concluent à une légère augmentation de la production photovoltaïque en Europe de l'ouest dans ce contexte, alors que Jerez et al. (2015) prévoient un léger déclin.

De récentes études ont montré une probabilité de diminution du facteur de charge moyen des centrales nucléaires pouvant aller jusqu'à 11,8 % (Förster et Lilliestam, 2009) et une baisse de la production hydroélectrique de l'ordre de 16,6 % pour l'hydraulique au fil de l'eau et 20,5 % pour l'hydraulique de lac (Lehner et al., 2005).

Les données météorologiques transformées selon le scénario RCP4.5 ont été intégrées dans le modèle de simulation du fonctionnement du système électrique présenté au Chapitre 2. On considère également une baisse de 11,8 % de la disponibilité nucléaire moyenne, une baisse de 16,6 % des ressources hydrauliques fatales et une baisse de 20,5 % des ressources hydraulique modulables (hors STEP). L'équilibre offre-demande est simulé avec ces nouvelles entrées, toutes choses étant égales par ailleurs. Aucune évolution de la production éolienne n'a été prise en compte en raison de la difficulté d'accès aux données de vitesse de vent futures. De même l'évolution de la production photovoltaïque a été négligée, le modèle évaluant la production photovoltaïque nationale développé dans le Chapitre 2 n'intégrant pas de lien explicite avec la température et la variation du rayonnement étant supposée faible.

Les résultats du modèle indiquent au niveau de la demande une baisse de la consommation nationale de l'ordre de 1,4 % et une division par deux des exportations (due à la baisse de disponibilité du nucléaire couplée à l'augmentation de la consommation en été). Au niveau de la production, une baisse de 10,3 % de la production nucléaire est observée. Cette baisse est moins importante que la baisse de disponibilité car la capacité nucléaire n'est pas toujours utilisée à 100 % de sa disponibilité. La production d'électricité à base de gaz et de charbon double.

Les effets sur les impacts environnementaux du mix électrique annuel moyen sont présentés à la Figure 93. Les conséquences sur l'évaluation environnementale sont importantes : une augmentation de 45 % ou plus pour 4 indicateurs sur 12 (effet de serre – GWP, acidification – AP, épuisement des ressources – ADP, production d'ozone photochimique – POP), une augmentation de 9 à 22 % pour 4 autres indicateurs (eutrophisation – EP, santé humaine – Hum, odeur – odor, déchets – waste). Les effets sont faibles (inférieurs à 5 %) pour seulement un tiers des indicateurs : les dommages à la biodiversité (Biodiv), la consommation d'énergie primaire (CED), la production de déchets radioactifs (Rad.W) et la consommation d'eau (Water).

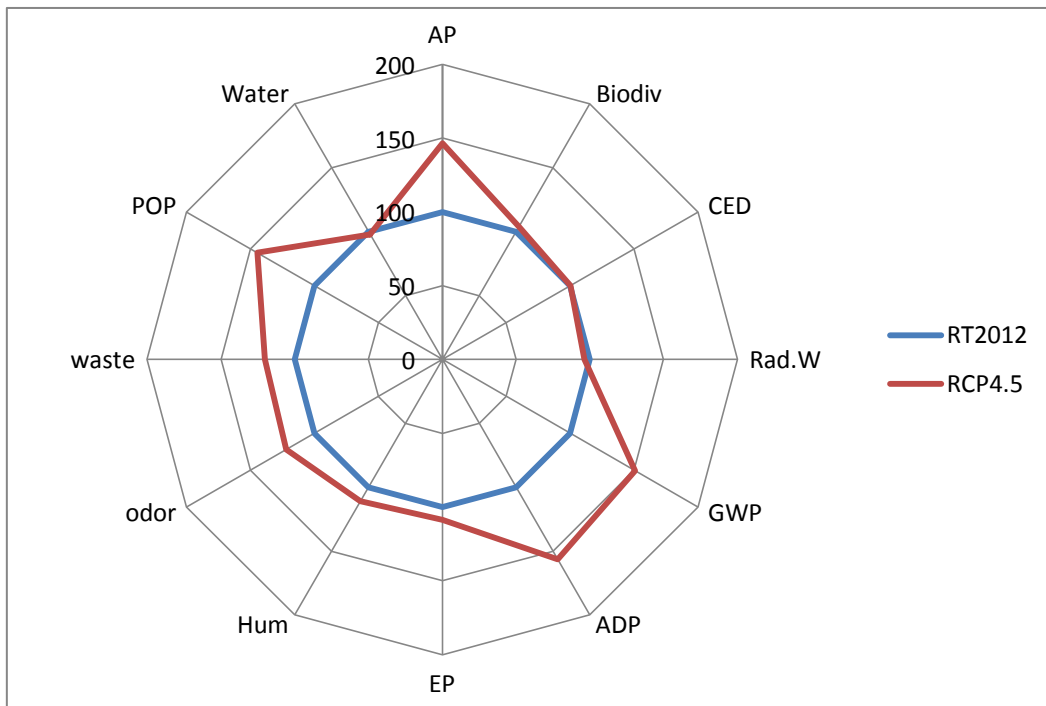


Figure 93 : Effets du réchauffement climatique sur les impacts environnementaux du mix annuel moyen

La disponibilité des centrales thermiques charbons et gaz pourrait également être affectée car certaines consomment de l'eau de rivière pour leur refroidissement à l'instar des centrales nucléaires. Cet effet a été négligé car leurs

besoins de refroidissement sont plus faibles que les centrales nucléaires (unité de production plus petite) et que ces centrales sont rarement exploitées à leur plein potentiel, contrairement aux centrales nucléaires produisant majoritairement en base.

On constate que les effets de la baisse de la consommation nationale d'électricité sont largement compensés par les pertes de ressources de production (disponibilité nucléaire, ressources hydrauliques).

4.2.4. Limitations et incertitudes

Seules les évolutions de la température sont intégrées dans cette étude. Or d'autres paramètres météorologiques seront affectés par le réchauffement climatique, comme le régime des précipitations, le régime des vents, la nébulosité et donc la part de rayonnement direct et diffus. Cependant, les évolutions des vitesses de vents et des précipitations au pas de temps horaire sont aujourd'hui mal représentées par les modèles climatiques (Hidalgo et al., 2014).

Il sera important d'affiner ces données dans le futur, en intégrant par exemple les effets de l'îlot de chaleur urbain. Celui-ci peut avoir des conséquences non négligeables sur la consommation de climatisation des bâtiments. L'augmentation prévue de la consommation de climatisation pourrait entraîner une augmentation de l'effet d'îlot de chaleur urbain, entraînant à son tour une augmentation de la consommation d'énergie dans les bâtiments (Pigeon et al., 2014).

Les effets du réchauffement climatique sur le système électrique, tant sur la demande que sur la production, sont importants. Les premiers calculs réalisés et présentés au paragraphe 4.2.3 montrent une augmentation de l'ordre de 50 % du potentiel de réchauffement global par kWh produit dans le cas d'un scénario de réchauffement contenu, type RCP4.5. L'intégration de ces paramètres dans les outils de modélisation prospective constitue une perspective de recherche importante. Il faudra bien sûr croiser l'évolution climatique avec l'évolution technologique du parc.

4.3. ÉVOLUTION TECHNOLOGIQUE

4.3.1. Hypothèses préalables

Concernant l'évolution des filières énergétiques, on pose premièrement les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La filière bois n'évolue pas, il n'y a pas de tension sur cette ressource en France et le gisement est *a priori* suffisant pour les années à venir (ADEME/MAAP, 2009) à condition que la ressource soit bien gérée.
- La filière gaz peut évoluer soit vers une utilisation accrue des ressources non conventionnelles, soit vers le développement des filières hydrogènes, biomasse et bio-méthane.
- Le système électrique va évoluer de façon différente selon le prix de la tonne de carbone sur le marché européen des quotas.

La section suivante revient plus en détail sur la modélisation prospective du secteur électrique et l'utilisation du modèle MARKAL-TIMES développé au Centre de Mathématiques Appliquées (CMA).

4.3.2. Le secteur électrique : utilisation du modèle de prospective MARKAL-TIMES

4.3.2.1. PRÉSENTATION DU MODÈLE

Le modèle de prospective énergétique MARKAL-TIMES développé par le CMA pour l'étude du système électrique français (Maizi et Assoumou, 2014) est utilisé pour modéliser l'évolution du parc français de production d'électricité à l'horizon 2050, avec un pas de temps de 10 ans. À partir de données exogènes sur les prix de l'énergie et le niveau de demande, le modèle MARKAL-TIMES optimise la production et les investissements à effectuer sur l'ensemble de la période considérée. La structure générale du modèle est présentée dans la Figure 94 .

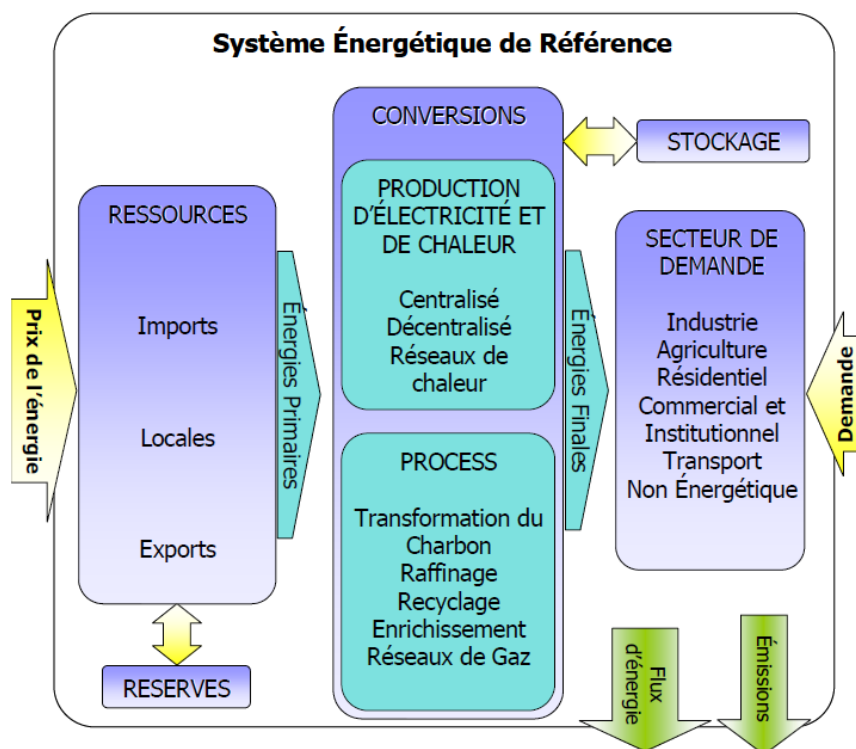


Figure 94 : Structure générale du modèle MARKAL, (Assoumou, 2006)

C'est un modèle *bottom-up* technologique qui résout l'équilibre économique offre-demande du système électrique à partir d'une demande exogène en minimisant le coût total du système sur l'ensemble de la période considérée (p. ex. 2010-2050). Le futur est considéré comme parfaitement connu et les choix d'investissements optimaux sont faits (paradigme optimal). Cette approche de modélisation prospective (via un paradigme optimal) peut être opposée aux modèles de simulation, généralement récursifs (résolution pas à pas) dont la connaissance du futur est supposée imparfaite (voir Chapitre 1, paragraphe 1.4.3).

Des contraintes peuvent être imposées comme une limite sur les émissions de CO₂, ou un objectif de réduction de la capacité nucléaire, ou encore une obligation d'augmentation de la production renouvelable.

4.3.2.2. MODÉLISATION DE LA CONSOMMATION NATIONALE D'ÉLECTRICITÉ FUTURE

Divers projets de recherche ont permis le développement de « générateurs de consommation nationale d'électricité ». Ceux-ci, utilisés en entrée du modèle MARKAL-TIMES développé au CMA, permettent une reconstitution de la demande en électricité *bottom-up*, i.e. en partant des besoins sectoriels. On réalise ainsi des projections futures en augmentant la pénétration de certains

appareils (p. ex. climatiseur) et en intégrant potentiellement le développement de nouveaux besoins (p. ex. véhicules électriques).

Le modèle MARKAL-TIMES propose une résolution au pas de temps horaire de la production d'électricité optimale. Il est possible grâce à cet outil de générer un nombre important de scénarios, qui peuvent modéliser des effets directement sur l'offre de production ou à travers l'évolution de la demande :

- usages de l'électricité : véhicule électrique ou non, effort d'efficacité énergétique, niveau de consommation nationale, etc. ;
- évolution du prix des technologies : prix des combustibles fossiles, compétitivité des énergies renouvelables, prix du nucléaire ;
- évolution et émergence de nouvelles technologies, p. ex. technologies de stockage, hydroliennes, capture et stockage de carbone ;
- contraintes politiques : taxe sur le CO₂, baisse à 50 % de la part du nucléaire dans la production, objectif de part des énergies renouvelables (p. ex. 30 % en 2030).

Dans un premier temps, quatre scénarios contrastés d'évolution de la demande à l'horizon 2050 ont été construits par le CMA en s'inspirant des scénarios RTE 2030 (RTE, 2013a). La Figure 95 résume les hypothèses structurantes pour l'évolution de la demande en électricité en termes de croissance démographique, de mobilité électrique, de taux d'équipement des ménages et de niveau d'efficacité énergétique.

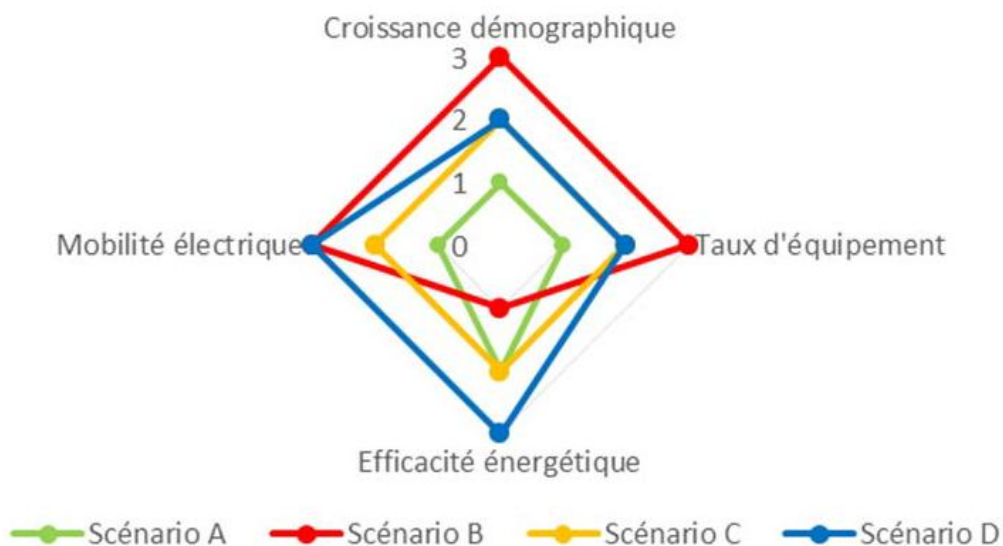


Figure 95 : Hypothèses structurantes pour la demande en électricité pour différents scénarios contrastés, (Assoumou et al., 2015)

Cette courbe de charge est ensuite perturbée par 4 profils stylisés de demande marginale équivalents à 1 TWh de demande supplémentaire, représentés sur la Figure 96 :

- un profil uniforme, d'une puissance moyenne de 0,1 GW (M1) ;
- un profil hiver, en créneau, avec 0,35 GW supplémentaire pour les mois de décembre, janvier et février (M2) ;
- un profil été, en créneau, avec 0,35 GW supplémentaire pour les mois de juillet, août et septembre (M3) ;
- un profil « pointe du soir » avec 0,55 GW supplémentaire, toute l'année, entre 18 et 22 heures (M4).

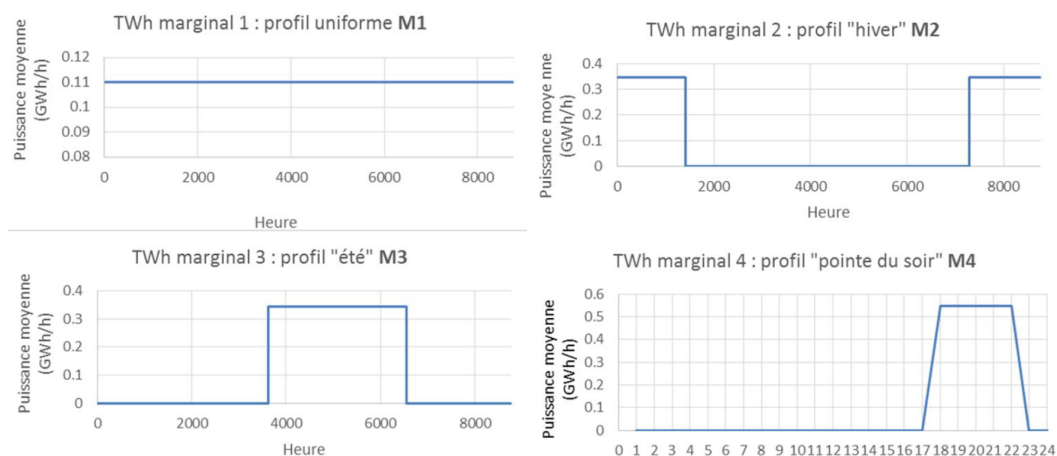


Figure 96 : Profil de TWh marginal de demande M1 à M4, (Assoumou et al., 2015)

4.3.2.3. MODÉLISATION DE LA PRODUCTION HORAIRE MOYENNE D'ÉLECTRICITÉ

MARKAL-TIMES reconstitue l'offre de production électrique à l'horizon 2050 au pas de temps horaire, pour deux journées types par mois : un jour de semaine et un jour de week-end. L'utilisation des capacités de production ainsi que l'installation de nouvelles capacités sont déterminées par le modèle via un programme linéaire de *minimisation sous contraintes du coût total actualisé du système énergétique* (Assoumou, 2006, p. 25).

Ces résultats peuvent être utilisés pour générer des mix moyens pour chaque heure de l'année et calculer des impacts environnementaux d'une manière similaire à la méthode « Attributionnelle Dynamique » présentée dans le Chapitre 3, mais pour une situation future.

Cette autre utilisation du modèle permet également, selon l'analyse du CMA (Assoumou et al., 2015), de quantifier l'ordre de grandeur des incertitudes de modélisation de l'offre liées aux incertitudes sur la modélisation de la demande. En effet, l'ajout d'une demande marginale stylisée peut permettre de modéliser une incertitude sur la demande : « Et si la demande en électricité était plus forte que prévue ? », « Et si la demande de pointe/hivernale/estivale était plus forte que prévue ? ». Le modèle MARKAL-TIME calculant les émissions de CO₂ directes de la production d'électricité, il est possible de visualiser la variabilité du contenu CO₂ de la production d'électricité lorsqu'on lui impose un bruit marginal (Figure

97). La demande marginale M1 correspond à une demande uniforme (courbe rouge foncé), la demande M2 à une demande hivernale (courbe verte), la demande M3 à une demande estivale (courbe violette) et la demande M4 à une demande pointe du soir (courbe bleue). Les abscisses donnent le code de la période temporelle considérée : MXX pour le mois de l'année, E pour un jour de semaine ou B pour un week-end, hXX pour l'heure de la journée.

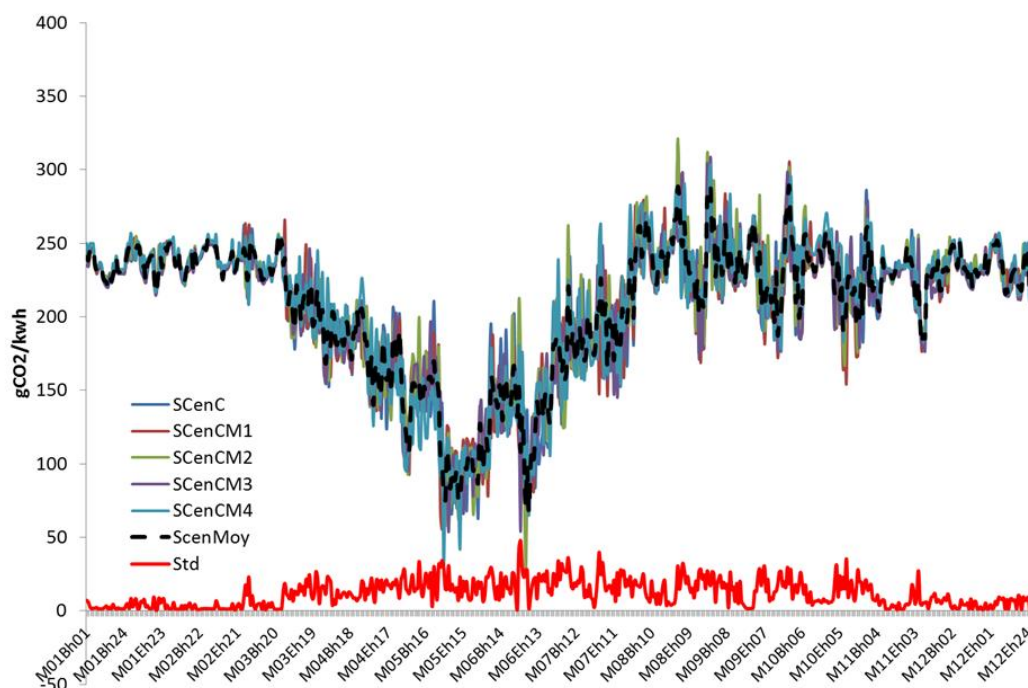


Figure 97 : Variabilités du contenu CO₂ avec un bruit marginal : scénario C, (Assoumou et al., 2015)

Dans un second temps, les hypothèses structurantes du scénario « médian », le scénario C (Figure 95), sont retenues pour construire les deux scénarios d'évolutions de l'offre (les scénarios A et B de la Figure 85) :

- un scénario « business-as-usual – BAU » (correspondant aux scénarios A dans la Figure 85) avec un budget CO₂ (émis direct) annuel constant ;
- un scénario de contrainte forte sur les émissions de gaz à effet de serre par imposition d'une taxe carbone (scénarios B dans la Figure 85).

A partir de ces hypothèses et contraintes, la production d'électricité et les investissements optimaux en capacités de production d'électricité sont déterminés par le modèle MARKAL-TIMES par optimisation du coût total actualisé sur l'ensemble de l'horizon temporel considéré (2010-2050).

Les résultats agrégés sous forme de mix électrique horaire sont donnés dans la Figure 98 et Figure 99 pour 2020, 2030 et 2050 pour les deux scénarios envisagés. Le premier est un scénario « business as usual » qui considère un

budget annuel d'émissions directes de CO₂ identique au niveau actuel. Le deuxième scénario intègre une taxe carbone forte sur les émissions de CO₂ directes dont la valeur est fixée sur la valeur officielle prévue pour les investissements publics futurs : 100€/tCO₂ en 2030 et 350€/tCO₂ en 2050.

Les différences entre les deux scénarios sont importantes, principalement concernant la proportion de charbon utilisée à l'horizon 2050 (avec ou sans séquestration) : celle-ci augmente fortement dans le cas du scénario A (BAU, Figure 98) par rapport à la situation actuelle alors qu'elle reste modérée dans le cas d'une taxe carbone (utilisation de centrales avec séquestration de carbone) (Figure 99). La variation saisonnière de la demande en électricité a des conséquences importantes pour les deux scénarios à l'horizon 2050 : la production thermique fossile (gaz et charbon) est pratiquement nulle à certaines périodes de l'année (autour des mois de mai-juin pour le scénario A, sur une plage plus étendue pour le scénario B), cette production fossile est plus importante en hiver et même complétée par l'utilisation de fioul et des importations (février notamment).

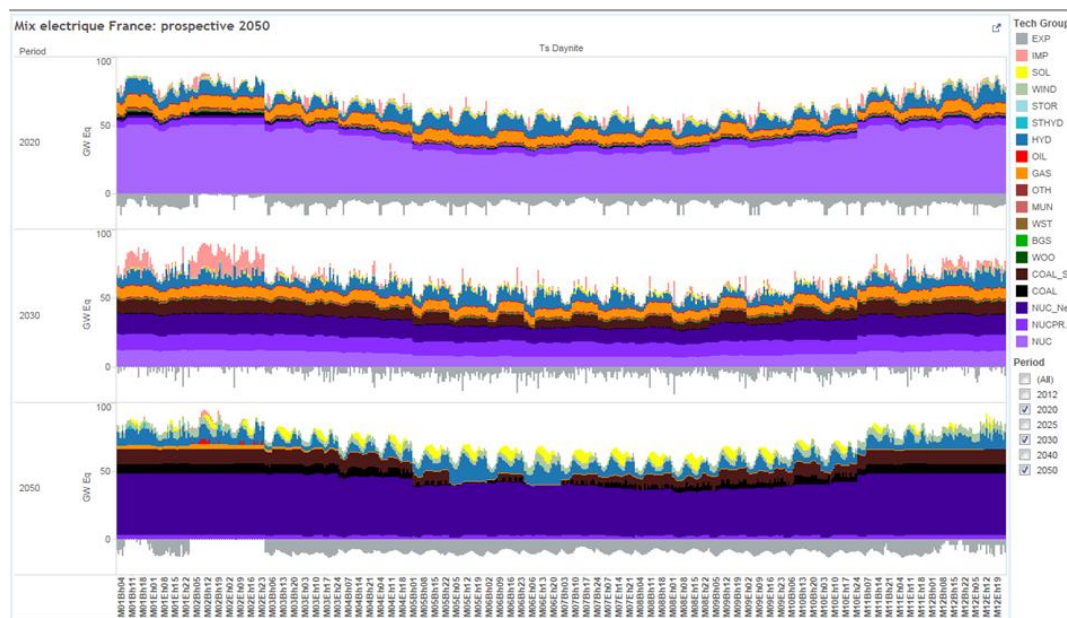


Figure 98 : Production d'électricité à l'horizon 2020 (haut), 2030 (milieu) et 2050 (bas) pour le scénario technologique A (type « Business as usual » avec un budget CO₂ annuel constant)

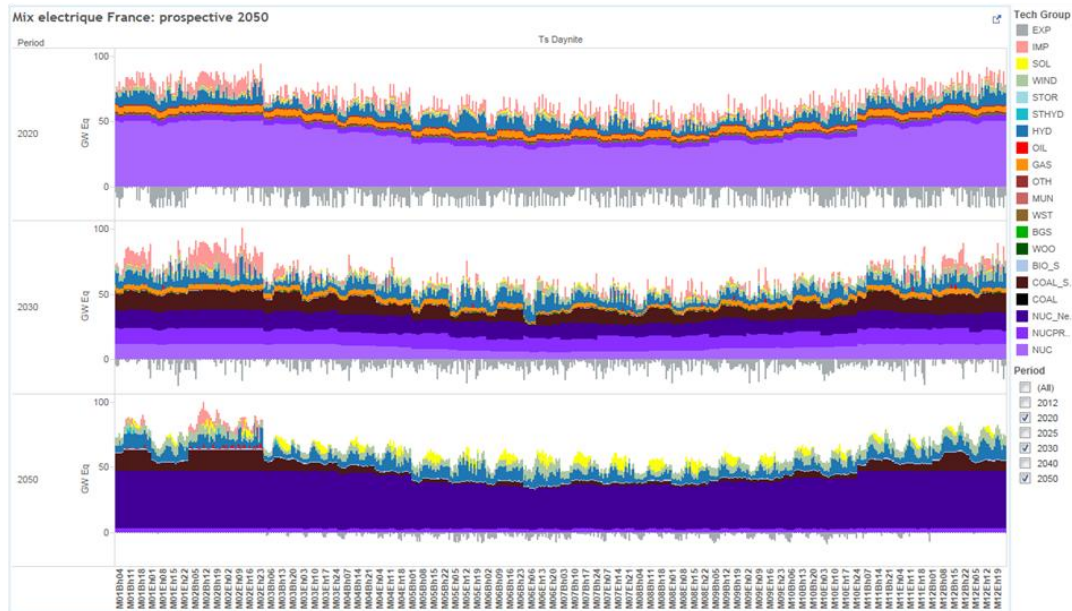


Figure 99 : Production d'électricité à l'horizon 2020 (haut), 2030 (milieu) et 2050 (bas) pour le scénario technologique B (type « taxe carbone forte »)

4.3.2.4. MODÉLISATION DE LA PRODUCTION MARGINALE D'ÉLECTRICITÉ, MÉTHODE GHG-P

La méthode GHG-P présentée au Chapitre 1 pour l'évaluation de la production marginale d'électricité est appliquée sur les productions d'électricité générées par le modèle MARKAL-TIMES.

La méthode « marginale dérivée », bien que plus précise, n'a pas pu être utilisée dans le cadre de cette modélisation prospective pour deux raisons principales :

- le modèle MARKAL-TIMES est un modèle lourd et complexe, il faut en pratique plusieurs jours pour obtenir les résultats. Il n'est donc pas envisageable de coupler ce modèle à un modèle d'analyse du cycle de vie des bâtiments et des quartiers et de recalculer un mix marginal pour chaque nouveau projet. Les résultats statiques obtenus par la méthode GHG-P sont par contre implémentables dans un outil d'écoconception.
- La méthode « marginale dérivée » nécessite de pouvoir simuler une variation marginale très faible de la demande, trop faible par rapport à la résolution numérique du modèle MARKAL-TIMES.

L'équation générale de la méthode GHG-P est rappelée :

$$ER_{\text{baseline}} = w \times BM + (1 - w) \times OM \quad 4-5$$

BM est la part correspondant aux infrastructures qui auraient été développée en l'absence du projet, OM représente les émissions de la production marginale à capacité fixe et w est un facteur entre 0 et 1 permettant de pondérer l'effet sur les infrastructures (long terme) et l'effet sur la production (court terme).

Les effets sur la production (OM) sont modélisés avec un niveau de marginalité de 10 % (marge opérative, voir Chapitre 1, paragraphe 3.4.2), un prix du charbon moins élevé que le gaz dans le cas du scénario BAU et plus élevé dans le cas de l'instauration d'une taxe carbone. Selon les directives du GHG-Protocol, la part affectant les capacités installées (BM) dépend de ce qui est évalué : une consommation supplémentaire ou une production supplémentaire (équivalent à une réduction de consommation). Dans cette étude, les effets BM sont négligés. Ce point est discuté dans le paragraphe 4.3.2.5, p 262.

Production marginale, effet OM

Les résultats obtenus en termes de mix électrique marginal agrégés sur l'année sont présentés sur la Figure 100. Les technologies fossiles (charbon – noir/gris clair et gaz –gris foncé) dominent largement le mix marginal dans le cas du scénario 1 (BAU) et ce quel que soit l'horizon temporel considéré. La part du charbon dépasse les 60 % en 2050.

Les résultats sont plus contrastés pour le scénario 2 (« taxe carbone »). À court et moyen terme (2020-2030), les importations dominent le mix marginal, montrant une tension importante sur la production d'électricité française. Cela pose également la question de la provenance de ces importations (pays) et de la technologie marginale de production associée. À long terme, la technologie du charbon à séquestration (gris clair) domine le mix marginal, suivie du nucléaire, dont la part dépasse les 30 %. Le gaz (gris foncé) est considéré par le modèle comme moins compétitif à long terme que le charbon à séquestration.

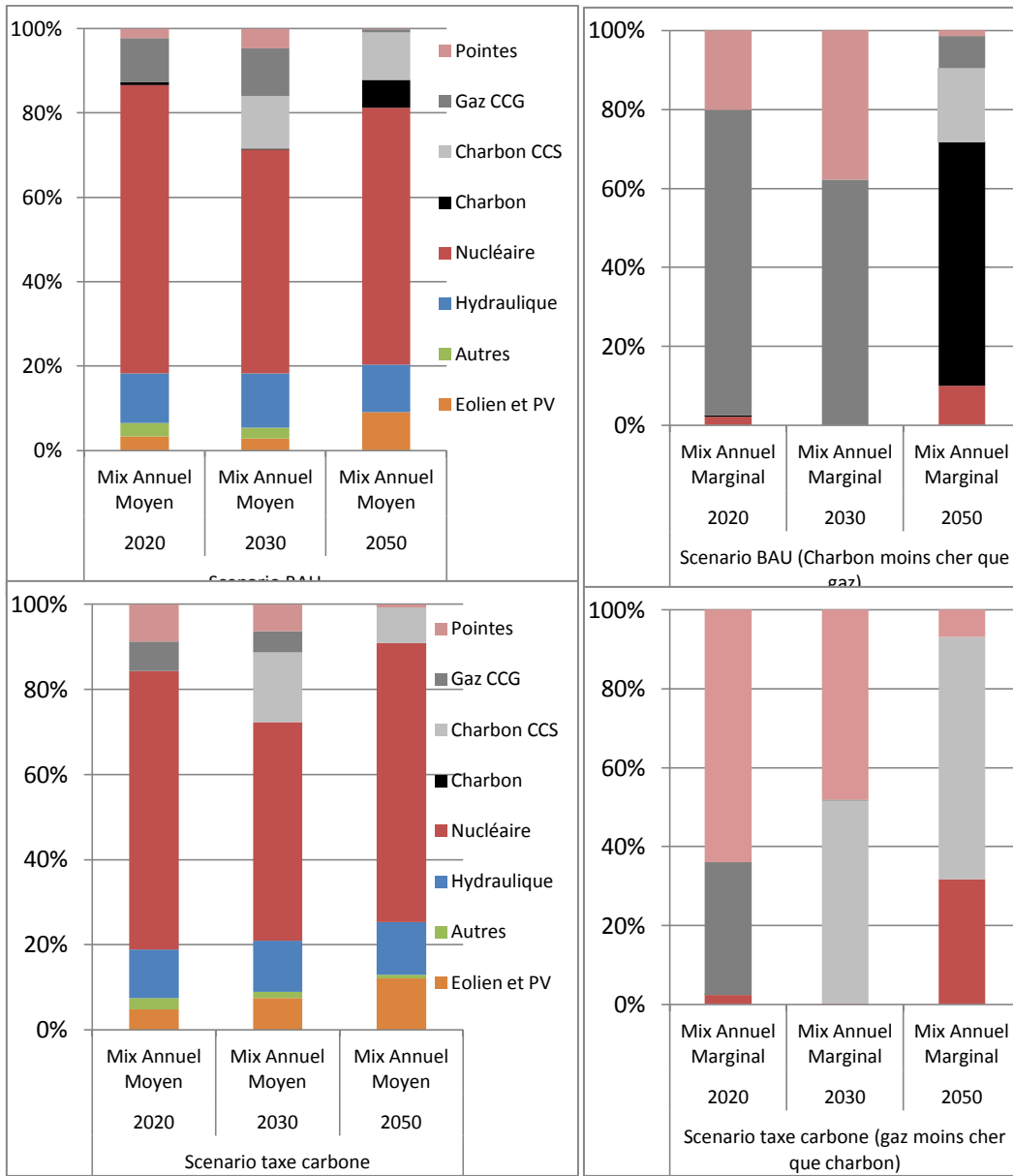


Figure 100 : Mix annuel moyen et mix marginal - méthode GHG-P - pour les scénarios prospectifs d'évolution technologique (A : BAU, B : taxe carbone)

4.3.2.5. DISCUSSION SUR LA PRODUCTION MARGINALE ET LES CAPACITÉS MARGINALES INSTALLÉES

La détermination des effets marginaux de l'augmentation de la demande en électricité suppose en principe d'analyser d'une part les effets sur la production de chaque technologie et d'autre part les effets sur les choix d'investissement en nouvelles capacités.

Le parti pris de la méthode utilisée ici est de ne considérer que les effets sur la production, ce qui a en particulier pour conséquence une contribution nulle des énergies renouvelables (fatales) aux mix marginaux.

La Figure 101 présente les résultats de 4 scénarios prospectifs développés par RTE à l'horizon 2030. Dans tous les cas, par rapport à 2013, la part des énergies renouvelables augmente, que la consommation baisse (Scénario D) ou qu'elle augmente (Scénario B). Les scénarios B et C comportent une part identique d'énergie renouvelable alors que leur niveau de demande est très différent. Cela illustre la probable non-corrélation entre l'installation des capacités renouvelables et le niveau de demande totale en électricité.

Comparaison du mix électrique en 2030 dans les quatre scénarios prospectifs
Énergie annuelle

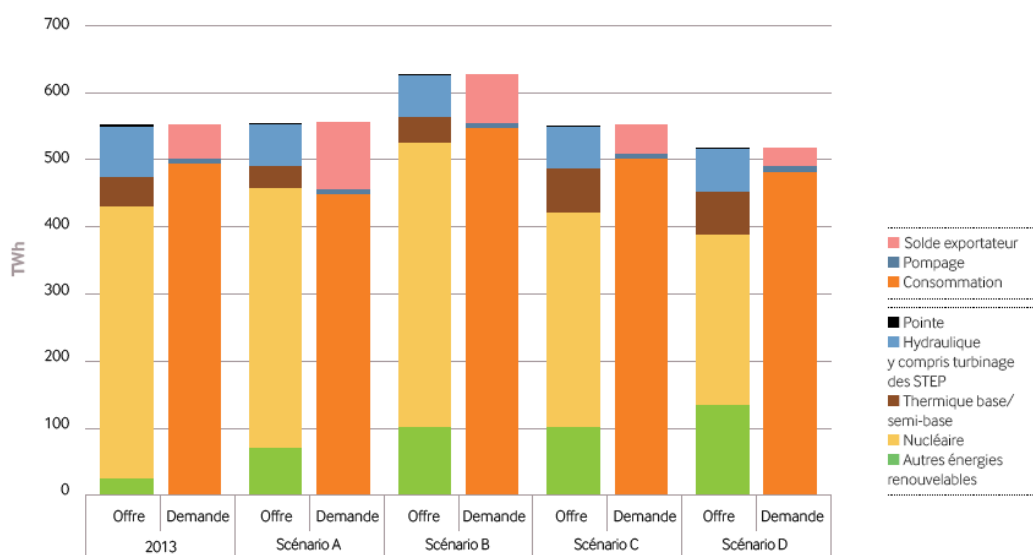


Figure 101 : Scénarios prospectifs RTE à l'horizon 2030, Bilan prévisionnel RTE 2014, p180

L'analyse des études prospectives effectuées par le gestionnaire de réseau RTE semble donc valider l'hypothèse excluant les énergies renouvelables (éolien, photovoltaïque, etc.) dans le mix marginal à long terme. L'installation de ces capacités est principalement déterminée par leur prix et les incitations publiques associées et non par le niveau de la demande. Le contexte politique et économique détermine la vitesse à laquelle elles remplacent petit à petit les autres sources d'énergies. Pour qu'elles soient considérées comme une capacité marginale installée en conséquence d'une augmentation de la demande, il faudrait qu'on atteigne un mix sans énergie fossile avant la fin de l'horizon temporel.

Ce constat est la conséquence de la structure actuelle du système électrique en France et pourrait être revu si la proportion d'énergie renouvelable devient majoritaire dans le futur.

Les investissements en nouvelles capacités de production sont planifiés de manière anticipée par les pouvoirs publics et les acteurs du secteur de l'électricité. La décision d'un choix de conception (bâtiment/quartier) ne peut être anticipée par les acteurs du secteur de l'électricité et influencer la planification de leurs investissements que si elle est antérieure à celle-ci. Le surdimensionnement du système électrique français, anticipant dans les années 80 une croissance importante de la consommation d'électricité est une des raisons du développement massif du chauffage électrique des décennies suivantes⁸³. Dans cet exemple, le secteur bâti a été affecté par la planification énergétique, et non l'inverse. Cette expérience historique renforce l'idée d'un séquençage décisionnel ne permettant pas directement au secteur bâti d'influencer les investissements énergétiques.

Les effets d'une variation de la demande en électricité des bâtiments sur les investissements en capacité de production, s'ils ont été négligés dans cette thèse, constituent néanmoins une perspective de recherche importante.

Cet axe devrait en particulier être approfondi dans le cas d'une analyse macro-économique portant sur les stratégies d'évolution du parc bâti dans son ensemble (politiques publiques, réglementation).

4.3.3. Autres secteurs

À l'horizon 2050, la filière gaz est supposée s'approvisionner à partir de sources non-conventionnelles (gaz de schiste) dans le cas d'un prix du carbone bas. L'approvisionnement en gaz dans le cas de la mise en place d'une taxe carbone est supposé correspondre à la vision ADEME 2050, soit un approvisionnement à base d'hydrogène (7 %), de gazéification de la biomasse (7 %), de bio-méthane (22,3 %) et de gaz naturel (63,7 %)(voir Figure 102). La filière bois reste inchangée.

⁸³ Une autre raison invoquée étant la volonté d'électrification des usages thermiques afin de diminuer la dépendance aux hydrocarbures suite aux chocs pétroliers. Voir le rapport Syrota de 2008 du Centre d'Analyse Stratégique, p. 25 (<http://archives.strategie.gouv.fr/cas/content/les-perspectives-energetiques-de-la-france-%E2%80%99horizon-2020-2050-0>, accédé en mai 2016).

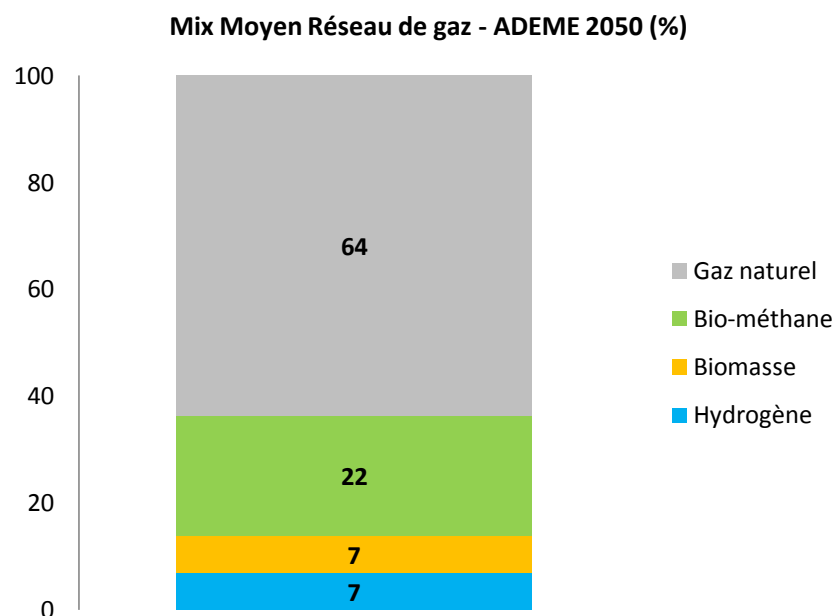


Figure 102 : Mix électrique et réseau de gaz à l'horizon 2050 - ADEME - Scénario 1/3

L'évolution des réseaux de chaleur urbains n'est pas intégrée : il n'est pas possible de définir des moyennes nationales pour les réseaux de chaleur urbains, très influencés par les caractéristiques locales. A partir des orientations proposées (le remplacement progressif des énergies fossiles par des énergies renouvelables, l'amélioration des rendements et l'intégration de cogénération), des études de sensibilité peuvent être effectuées à l'échelle du quartier étudié pour modéliser les évolutions prévues du réseau de chaleur urbain local. Ces questions sont traitées en partie dans le Chapitre 5.

Aucune hypothèse n'a été incluse pour le cas des chaudières fioul, considérées comme une technologie en voie d'obsolescence dans le secteur du bâtiment. Pour l'analyse d'autres secteurs, comme le secteur des transports, les récentes autorisations d'importation de pétrole issu des sables bitumineux canadiens pourrait être un objet d'investigation non négligeable.

4.3.4. Limitations et incertitudes

4.3.4.1. DONNÉES SUR LES FILIÈRES ÉNERGÉTIQUES

Il existe très peu d'études d'analyse de cycle de vie portant aujourd'hui sur l'utilisation des ressources fossiles non conventionnelles. Les études existantes sont souvent monocritères, focalisées sur le changement climatique (Hultman et al., 2011 ; Burnham et al., 2012 ; Jiang et al., 2011 ; Howarth et al., 2011). Une étude seulement concerne les impacts sur la ressource en eau (Clark et al., 2013). Aucune étude

intégrant des critères de toxicité et/ou d'écotoxicité n'a été trouvée. De plus, les études existantes ont des conclusions contradictoires : Howarth et al. (2011) concluent à des émissions de gaz à effet de serre bien plus importantes pour le gaz non conventionnel (gaz de schiste) par rapport au gaz conventionnel alors que d'autres études concluent que les émissions de gaz à effet de serre du gaz conventionnel ou non conventionnel sont similaires et surtout bien plus basses que les émissions de centrales à charbon (Jiang et al., 2011 ; Hultman et al., 2011).

Les données disponibles sont trop peu nombreuses et trop limitées (monocritère) pour pouvoir être intégrées. Par défaut, les données ACV sur le gaz conventionnel sont donc conservées pour cette étude, ce qui est une limitation importante, notamment concernant les indicateurs de toxicité et de consommation d'eau.

4.3.4.2. DURÉE DES EXERCICES PROSPECTIFS

Les exercices prospectifs disponibles s'arrêtent à l'horizon 2050. Or le projet étudié arrivera probablement en fin de vie après cette date. Il faut donc faire des hypothèses sur l'évolution des filières énergétiques après 2050 :

- prolongation des tendances ;
- années suivantes identiques à l'année 2050.

La prolongation des tendances supposerait d'analyser les tendances fortes et les signaux faibles afin de les prolonger. Plusieurs hypothèses doivent être faites pour déterminer les tendances à prolonger : tendances en production électrique, en dynamique d'investissement, en prix des combustibles, etc. Les incertitudes associées à l'étude prospective, déjà importantes, augmenteraient encore.

La deuxième option revient à considérer que l'analyse est valide pour un horizon jusqu'à 2050 mais pas au-delà, tout en tenant compte de la durée de vie réelle du projet étudié. C'est déjà l'approximation qui est faite aujourd'hui lorsqu'on utilise un mix annuel moyen actuel en le prolongeant sur l'ensemble du cycle de vie du projet étudié, puis en se ramenant à l'échelle d'un an. Cette option revient donc à améliorer la méthodologie actuelle en étendant la plage de validité des résultats de l'analyse du cycle de vie. Cette approche est donc sélectionnée afin de ne pas ajouter de paramètres incertains à l'étude.

Afin de simplifier l'implémentation de la deuxième option, une plage de validité est fixée pour chaque jalon temporel: l'évaluation présente est considérée comme valide pour p. ex. 10 ans, l'évaluation à 2030 pour 20 ans et l'évaluation 2050 pour le reste du cycle de vie. Elle permet de pondérer les effets présents et futurs et d'étudier la sensibilité à cette pondération. Cette alternative est utilisée dans la suite de l'étude.

4.3.4.3. NOMBRE ET DIVERSITÉ DES SCÉNARIOS

Seuls deux scénarios d'évolution du mix électrique sont *in fine* utilisés dans cette étude. Cela peut paraître restreint au regard du nombre d'hypothèses à fournir et des incertitudes pesant sur celles-ci. Le développement d'un cadre d'étude plus systématique, fonctionnant sur un horizon plus large des possibles, pourrait être envisagé. Les travaux de Rozenberg et al. (2013) proposent par exemple une méthodologie systématique de création de scénarios pour un objectif particulier. La difficulté au niveau de l'écoconception des bâtiments est de croiser des enjeux de comportement dynamique des bâtiments avec des enjeux prospectifs. La quantité de données à traiter est un facteur limitant important pour entreprendre cette démarche, qui de plus doit être réalisée dans un cadre interdisciplinaire avec une forte collaboration entre spécialistes du bâtiment et prospectivistes.

4.4. CALCULS DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

4.4.1. Introduction et méthodologie générale

On dispose donc d'une situation de référence, correspondant au temps présent, caractérisée par un climat historique (données météorologiques types, par exemple RT2012), par un système électrique actuel et un réseau de gaz fonctionnant au gaz naturel.

Le Chapitre 1 a montré que l'évaluation des impacts environnementaux liés à la consommation d'électricité dans le cadre de cette situation de référence pouvait être calculée selon plusieurs approches (attributionnelle statique ou dynamique, marginale). De même, dans le cas d'une étude prospective, la détermination des technologies satisfaisant la consommation en électricité ou en énergie de l'ensemble bâti peut se faire selon une approche attributionnelle ou conséquentielle. Ces deux variantes méthodologiques sont développées dans les paragraphes suivants après une description de la méthodologie générale commune.

On définit alors une méthodologie générale en quatre étapes :

1. Vérification du respect de l'unité fonctionnelle en climat futur : les critères de confort posés pour la situation présente doivent être validés pour la situation future. Une simulation thermique dynamique en climat futur doit être réalisée. Si les adaptations de comportement (p. ex. occultations, surventilation nocturne) ne suffisent pas à garantir un niveau de confort minimal en climat futur, le bâtiment de départ doit être modifié (changement de l'enveloppe, ajout de système). Cela permet également de déterminer la consommation horaire d'énergie du projet en climat futur, pour chaque jalon temporel.
2. Réalisation d'une analyse du cycle de vie complète des variantes proposées en considérant la situation présente. L'étude intègre les phases de construction, de rénovation, d'utilisation et de démolition.
3. Évaluation des impacts environnementaux associés aux consommations d'énergies futures pour chacun des scénarios et chaque jalon temporel, selon l'approche attributionnelle ou conséquentielle. La phase d'utilisation de l'ACV est complétée pour intégrer la vision prospective.
4. Synthèse des impacts présents et futurs pour les quatre scénarios, selon l'approche choisie.

La valeur d'un indicateur est représentée pour chaque variante du projet (Figure 103). Cette synthèse regroupe la valeur présente de l'indicateur (croix

bleue), la moyenne des évaluations intégrant la vision prospective (croix rouge) ainsi que les valeurs de chaque évaluation prospective (ronds noirs) pour encadrer cette moyenne. Plusieurs variantes d'un même projet peuvent alors être comparées, la synthèse graphique met en exergue les cas où l'évolution de l'arrière-plan est en mesure d'affecter les conclusions de l'étude.

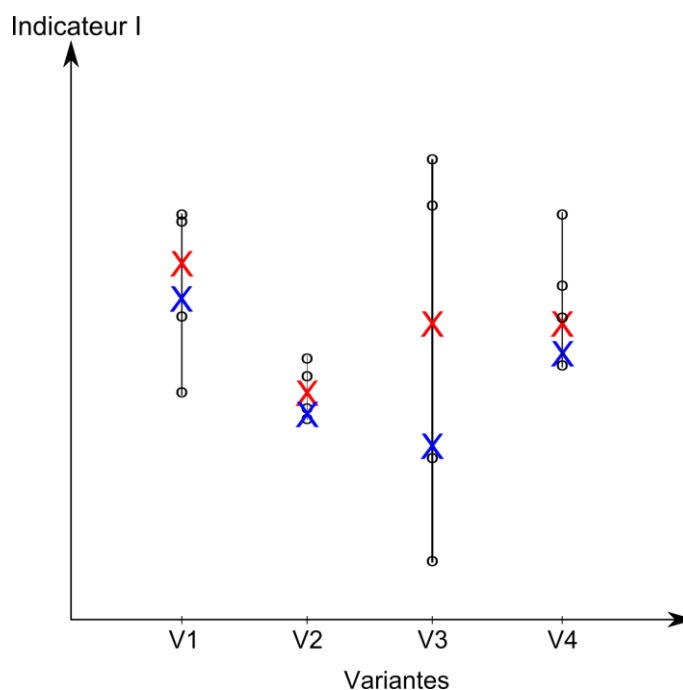


Figure 103 : Exemple de représentation de la synthèse des impacts pour les différents scénarios, méthode prospective

Sur le cas fictif présenté Figure 103 pour quatre scénarios, la variante 3, qui était la plus favorable en situation présente pour l'indicateur I, présente des risques de ne plus être la meilleure variante si l'on tient compte du futur. Deux des quatre scénarios lui sont favorables. Les résultats de la variante 2 sont beaucoup plus robustes par rapport aux scénarios testés.

4.4.2. Intégrité de l'unité fonctionnelle

Quelle que soit l'approche sélectionnée pour la réalisation de l'étude (attributionnelle ou conséquentielle), la première étape consiste à définir une fonction puis une unité fonctionnelle qui doit rester valable tout au long de la durée de vie du produit.

La détermination d'une unité fonctionnelle pour l'analyse de cycle de vie des bâtiments et des quartiers peut être une étape ardue (Erlandsson et Borg, 2003) étant donnée la complexité du système étudié et ses éventuelles fonctions secondaires ou co-produits. Cette unité fonctionnelle comporte généralement

une fonction principale correspondant à l'utilisation du ou des bâtiment(s) (logement, tertiaire, etc.), un nombre d'occupants et/ou une surface, une durée de vie technique présumée et des critères de confort.

L'intégration des critères de confort (température, salubrité, qualité de l'air) est essentielle. Ils garantissent la satisfaction de la fonction principale du bâtiment : peut-on travailler dans un bureau non chauffé ou dans lequel une ventilation suffisante n'est pas assurée ou encore dans lequel la température pendant les heures de travail dépasse 30 °C ?

L'unité fonctionnelle doit donc intégrer de façon quantifiée l'ensemble des éléments de confort essentiels à la réalisation de la fonction du bâtiment.

L'introduction de la vision prospective proposée suppose de vérifier que le bâtiment satisfera toujours ces critères de confort dans le futur. Si aujourd'hui de nombreux bâtiments peuvent se passer de climatisation, une étude récente de l'ADEME sur des bâtiments BBC a montré que ce ne sera pas le cas dans le futur (ADEME, 2010b). L'étude montre également que certains choix de conception sont plus favorables que d'autres concernant le confort estival en climat futur. Si la consommation de la climatisation n'est pas intégrée car elle n'est pas nécessaire aujourd'hui, la consommation d'électricité future des différentes variantes sera sous-estimée.

Après avoir défini l'unité fonctionnelle intégrant les critères de confort, la réalisation d'une simulation thermique-dynamique en climat futur permet de vérifier le respect des critères de confort sur l'ensemble de la durée de vie du bâtiment.

Seuls les besoins de chauffage et de refroidissement sont affectés, les besoins en ECS et en électricité spécifique, éclairage, ventilation sont considérés indépendants de l'évaluation du climat.

4.4.3. ACV présent

Les analyses du cycle de vie des différentes variantes étudiées respectant l'unité fonctionnelle en climat présent et futur sont effectuées. Elles correspondent aux méthodologies détaillées dans les travaux de Polster et Peuportier et al. (Polster et al., 1996b ; Peuportier et al., [sans date], 2013).

Le Tableau 36 reprend les principales hypothèses à inclure selon que l'on choisit une approche attributionnelle ou conséquentielle. Il reprend les conclusions du Chapitre 1 et du Chapitre 3.

Tableau 36 : Hypothèses principales selon l'approche utilisée

Hypothèses de modélisation	Attributionnelle (ACVA)	Conséquentielle-projet (ACVC)
Fabrication des matériaux	Technologie(s) moyenne(s)	Technologie(s) marginale(s)
Carbone biogénique	Bilan neutre	Bilan différencié
Utilisation de matériaux recyclés – bénéfice intégré–	Méthode des stocks 100 %	Prise en compte des contraintes de marché : 0 ou 100 % (par défaut : 50/50)
Recyclage/valorisation en fin de vie des matériaux – bénéfice intégré–	Méthode des stocks 0 %	Prise en compte des contraintes de marché : 0 ou 100 % (par défaut : 50/50)
Export d'énergie/ coproduction	Méthode des coproduits : allocation des infrastructures de production	Méthode des impacts évités : substitution des technologies marginales
Système de modélisation de la base de données pour l'arrière-plan	cut-off	Allocation at the Point Of Substitution (APOS)

4.4.4. Modélisation des impacts futurs de la phase d'utilisation

La prise en compte du futur s'effectue principalement sur la phase d'utilisation. Les données sur les futurs procédés de maintenance ou les futurs procédés de recyclage et de traitement des déchets sont pratiquement inexistantes dans la littérature ACV et peuvent dépendre fortement des conditions locales en ce qui concerne les bâtiments. De façon conservatrice, ces différents matériaux et procédés sont donc évalués en considérant les matériaux et procédés actuellement disponibles.

La phase d'utilisation du bâtiment/quartier étudié inclut sa consommation d'eau, d'énergie et éventuellement le traitement des déchets ménagers et le transport quotidien des occupants (en particulier dans le cas du quartier). Le traitement des déchets ménagers est fortement lié aux caractéristiques locales (présence d'incinérateur, centre de tri à proximité, etc.) et au comportement des habitants. Son évolution future ne peut être intégrée de façon automatique dans un outil ACV et doit être modélisée à partir des données collectées auprès des services publics et du maître d'ouvrage (voir Chapitre 5). Le transport quotidien des occupants est une problématique particulière. Des outils dédiés existent afin de modéliser les phénomènes de congestion et les émissions directes des véhicules (particuliers ou transports en commun) en résultant. Ces données

peuvent également être intégrées à l'étude mais cela nécessite une modélisation complexe du réseau de transport environnant le projet (voir Chapitre 5).

L'évolution du réseau électrique national et des autres filières énergétiques est indépendante du contexte particulier du projet et peut donc être intégrée de façon systématique à un outil d'écoconception des bâtiments et des quartiers.

4.4.4.1. CAS DE L'ÉLECTRICITÉ

Le modèle MARKAL-TIMES permet de suivre l'évolution de la production d'électricité et des capacités installées. Pour chaque jalon de la période étudiée (2030-2050) et pour chacun des deux scénarios (taxe carbone haute ou basse) on dispose de la production prévue pour chaque technologie au pas de temps horaire, pour deux jours par mois (jour de semaine et jour de week-end).

Dans le modèle MARKAL-TIMES, plusieurs nouvelles technologies sont considérées comme développées à l'horizon 2050 : éolienne nouvelle génération, séquestration du CO₂, etc. Malheureusement, les données environnementales correspondantes ne sont pas toujours disponibles et la plupart de ces évolutions technologiques ont été négligées ou évaluées en considérant des procédés plus anciens (p. ex. génération actuelle d'éoliennes).

La séquestration du carbone a été intégrée de façon simplifiée en tenant compte d'une baisse des émissions directes de 700 gCO₂eq par kWh d'électricité produit dans une centrale à charbon, selon les résultats de l'étude de Rubin et al. (2007).

4.4.4.2. AUTRES FILIÈRES ÉNERGÉTIQUES

Les autres vecteurs énergétiques (gaz et bois) sont évalués en utilisant une donnée moyenne annuelle en rapportant les technologies utilisées à leur inventaire dans la base de données ecoinvent v3. L'évaluation des impacts futurs considère le mix de production futur pour le gaz et reste inchangé pour le bois.

Concernant le mix de gaz, aucune donnée sur la production d'hydrogène n'est disponible dans la base de données ecoinvent. Le mix de gaz futur à 2050 du scénario B est représenté de façon simplifiée en considérant 63,7 % de gaz naturel et 36,3 % de méthane provenant de biogaz et biomasse (moitié moins de biogaz et biomasse sont considérés à l'horizon 2030).

4.5. RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

4.5.1. Évolution climatique : évolution des degrés-jours

Les données de températures horaires des huit stations de la RT2012 ont été transformées selon la méthode de morphing présentée au paragraphe 4.2.2. Les résultats agrégés sous forme de degrés-jours unifiés (DJU) de chauffe et de refroidissement sont présentés ci-après (Figure 104).

Les DJU de chauffe (resp. de refroidissement) sont calculés en sommant, sur chaque jour de la période de chauffe (resp. de refroidissement), la différence entre une température de référence ($T_s = 18\text{ °C}$ en chauffe et $T_s = 24\text{ °C}$ en refroidissement⁸⁴) et la moyenne des températures minimales et maximales sur la journée (équation 4-6 et 4-7). Les DJU de chauffe (resp. de refroidissement) sont comptabilisés seulement si la température moyenne est inférieure (resp. supérieure) à la température seuil.

$$DJU_{\text{chauff}} = \sum_{\text{chauff}} \left(T_s - \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} \right) \quad 4-6$$

$$DJU_{\text{froid}} = \left(\sum_{\text{froid}} \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} - T_s \right) \quad 4-7$$

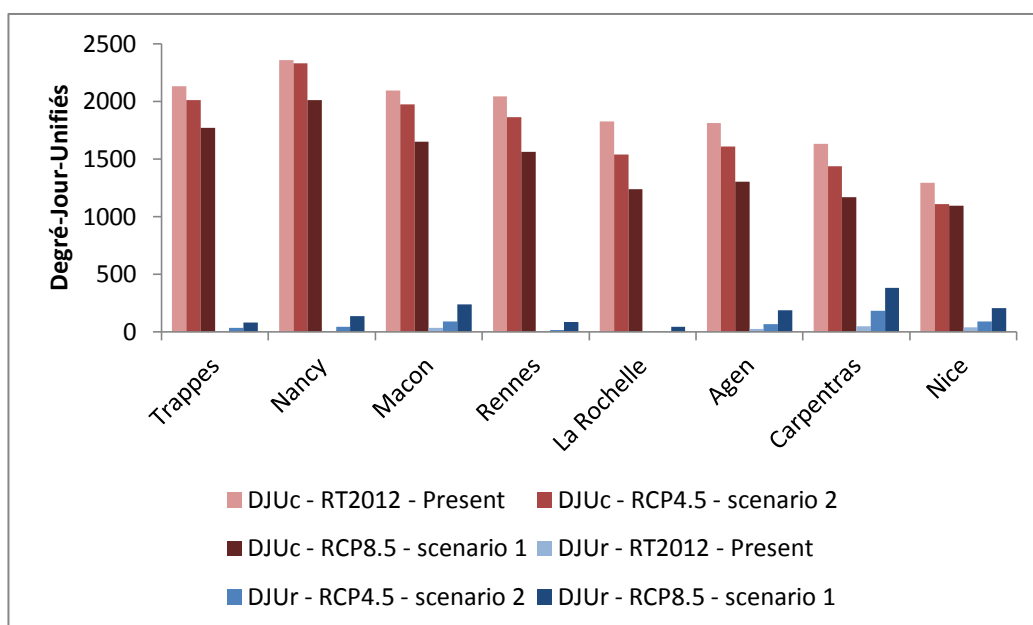


Figure 104 : DJU de chauffe (rouge) et de refroidissement (bleu), présent et futur RCP 4.5 (Scénario 2) ou RCP 8.5 (Scénario 1)

⁸⁴ Valeurs seuils utilisées dans (Koukou-Arnaud et al., 2011)

Les résultats montrent d'abord que les degrés-jour de chauffe restent beaucoup plus importants que les degrés-jour de refroidissement. Les DJU de chauffe diminuent en moyenne de 9 % alors que les DJU de refroidissement augmentent de façon très importante (multiplication d'un facteur 3 en moyenne pour RCP 4.5 et 9 pour le RCP8.5).

Une disparité forte existe entre les stations : les DJU de chauffage sont peu affectés pour la station de Nancy en RCP 4.5 (baisse de moins de 2 %) alors que ceux de La Rochelle et Nice baissent de plus de 14 % en RCP4.5 par rapport à aujourd'hui. De même pour les DJU de refroidissement : La Rochelle est relativement peu affectée par rapport à Carpentras ou Mâcon.

L'évolution du climat est suffisamment importante pour modifier de manière non négligeable le comportement thermique des bâtiments. Selon leur position géographique, les bâtiments seront affectés de façon différente par le dérèglement climatique.

4.5.2. *Évolution technologique : impact moyen des filières énergétiques futures*

Les impacts environnementaux de la production et de la distribution de 1 kWh d'énergie ont été calculés pour chaque jalon temporel (présent – 2030 et 2050), selon une approche attributionnelle (mix moyen) et une approche conséquentielle (mix marginal).

Le mix marginal d'électricité future est déterminé en appliquant la méthode GHG-P à la production d'électricité calculée par le modèle MARKAL-TIMES. Le mix marginal de gaz est supposé composé à 100 % de gaz naturel. Les résultats de l'évaluation environnementale pour l'électricité sont présentés sur la Figure 105.

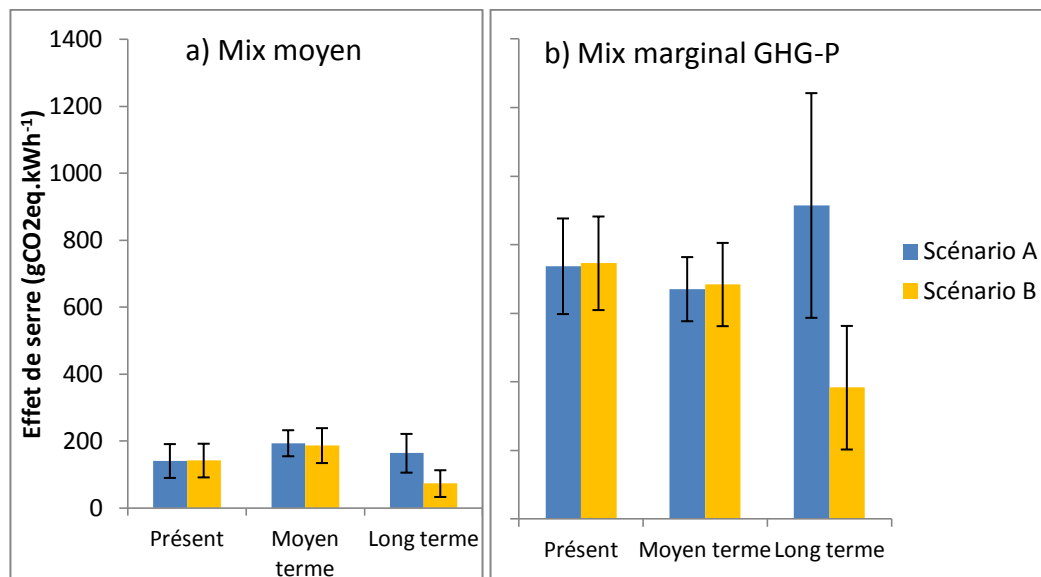


Figure 105 : Potentiel de réchauffement global des mix prospectifs moyens (a) et marginaux (b), moyenne annuel et écart type observé sur l'année (écart type des valeurs horaires) pour les deux scénarios d'évolutions technologiques (A : BAU, B : taxe carbone)

L'évolution de la production électrique déterminée dans le scénario A conduit à une relative stabilisation de l'indicateur d'effet de serre. Le scénario B (taxe carbone forte) conduit, pour le mix moyen comme pour le mix marginal, à une baisse importante à long terme.

Les différences d'amplitude entre le mix marginal et le mix moyen restent proches de ce qui a été observé dans le présent. En revanche, la valeur absolue du potentiel de réchauffement global du mix moyen actuel (2012), et futur proche (2020) est environ deux fois plus élevée que la valeur obtenue pour le système de référence présenté dans le Chapitre 2 (Tableau 37). L'écart relatif sur l'effet de serre du kWh marginal est par contre relativement faible entre les deux modèles (1 à 22 %). Les différences obtenues s'expliquent principalement par trois facteurs :

- Le choix de la modélisation de la demande : dans le modèle MARKAL-TIMES, l'année 2012 est utilisée comme base pour modéliser la demande en électricité. La vague de froid de février 2012 est une particularité forte de cette année, qui a engendré un comportement singulier du système électrique : fonctionnement important des moyens de pointes et des importations. Ceci fait mécaniquement augmenter la part de ces technologies carbonées dans le mix moyen annuel.
- La faible disponibilité nucléaire par rapport à la capacité installée : production annuelle de 395 TWh en 2020 et 397 TWh en 2012 pour le scénario C, soit un coefficient de production de 71,5 % contre 74,2 % dans le modèle de référence court terme.

- La faible proportion d'énergie renouvelable considérée : une production éolienne de 15,3 TWh et photovoltaïque de 3,7 TWh en 2012 contre 17,6 TWh et 6,4 TWh resp. dans le système de référence court terme.

Tableau 37 : Comparaison entre le modèle de prévision développé au Chapitre 3 et le modèle MARKAL-TIMES sur l'évaluation de l'indicateur d'effet de serre par kWh d'électricité produit

Effet de serre (gCO ₂ eq/kWh)	Modèle de référence (Chapitre 3 et 4)	MARKAL-TIMES (2012)	MARKAL-TIMES (2020 – Scénario A – BAU)
Mix de la production totale annuelle (mix moyen)	79	141	115
Mix de la production marginale annuelle (mix marginal)	605	737	601

Ces différences illustrent l'emploi distinct des deux modèles. Le système de référence court terme a pour objectif de représenter de façon précise l'état actuel du système électrique. Il est orienté vers la prévision à court terme des impacts environnementaux. Le modèle MARKAL-TIMES reflète les évolutions tendanciennes du système électrique et de ce fait ne peut imposer de contraintes trop strictes sur la production. Son objectif premier est d'analyser les risques et enjeux liés à la planification à long terme des investissements.

La valeur de l'indicateur d'effet de serre par kWh marginal est également plus haute dans le cas du modèle MARKAL-TIMES à court terme (2012) par rapport au modèle de référence court terme. Les mêmes raisons que précédemment peuvent être évoquées. La tendance observée est cependant similaire : en marginal, les technologies majoritairement contributrices au mix sont les technologies fossiles, ce qui conduit à une multiplication par plus de 5 des impacts par kWh fourni, pour un indicateur comme la contribution à l'effet de serre. Il est intéressant de constater que le phénomène persiste sur le long terme, avec une saturation à 1200 gCO₂eq par kWh (correspondant aux centrales à charbon). En fonction du scénario considéré et de l'horizon temporel, la valeur de l'indicateur d'effet de serre par kWh marginal est entre 3,4 et 6,7 fois plus élevée que la valeur par kWh moyen (Figure 105).

4.6. ÉTUDE DE CAS SIMPLE

4.6.1. Introduction

L'étude de cas présentée au Chapitre 3 est reprise en considérant la variante I-BB des maisons INCAS comme cas d'étude. L'approche prospective portant sur l'évolution du système énergétique et sur l'évolution du climat, on considère les simplifications et modifications suivantes par rapport au Chapitre 3:

- L'ensemble des matériaux est considéré comme déchets inertes en fin de vie et envoyé en décharge.
- La consigne de chauffage est fixée à 21 °C constant.
- La consigne de climatisation est fixée à 28 °C constant.
- Une sur-ventilation nocturne à 15 vol.h⁻¹ et un scénario d'occultation de 7 à 19h sont considérés en période estivale.

Le déroulement de l'étude de cas est présenté selon les cinq étapes prévues pour la méthodologie prospective :

- vérification du respect de l'unité fonctionnelle en climat futur. La consommation d'énergie est déterminée pour chaque jalon temporel ;
- réalisation de l'analyse du cycle de vie complète des variantes proposées en considérant la situation présente ;
- évaluation des impacts environnementaux associés aux consommations d'énergies futures ;
- synthèse des impacts présents et futurs pour les quatre scénarios, selon l'approche choisie.

Les résultats sont présentés seulement pour l'indicateur potentiel de réchauffement global afin d'illustrer la méthodologie sans trop alourdir la lecture du document.

4.6.2. Vérification du respect de l'unité fonctionnelle et évaluation des besoins énergétiques

Le résultat de la simulation thermique dynamique en utilisant les données climatiques RT2005, RT2012, RCP 4.5 et RCP 8.5 pour la station de Mâcon sont données dans le Tableau 38 ci-dessous.

Tableau 38 : Résultats de la STD

	Besoins de chauffage (kWh annuels)	Besoins de climatisation (kWh annuels)	Nb d'heures/an où T > 27 °C sans clim	T _{max} séjour sans clim (°C)
Maison I-BB RT2005	2189	23	69	28,5
Maison I-BB RT2012	1631	255	175	30,8
Maison I-BB Futur RCP 4.5	1435	575	347	31,9
Maison I-BB Futur RCP 8.5	1037	1866	893	34,7

Si la question du confort d'été apparaissait par le passé négligeable (calcul RT 2005) avec environ 70 heures dans l'année dépassant la limite de confort de 27 °C et un maximum ne dépassant pas 28,5 °C, ce n'est plus le cas en climat futur, même avec un réchauffement contenu type RCP4.5 : le nombre d'heures où la température du salon est supérieure à 27 °C dépasse les 340 heures, soit environ 15 % des heures d'été (juin-juillet-août).

Afin de respecter l'unité fonctionnelle de la maison, on considère qu'un système de climatisation est installé à partir de 2030. Les besoins en électricité spécifique⁸⁵ (3224 kWh, ventilation et éclairage inclus) et en ECS (2863 kWh) sont considérés comme inchangés sur la période. L'éclairage et la ventilation consomment respectivement 263 et 175 kWh par an.

4.6.3. ACV Présent

Les impacts environnementaux calculés au Chapitre 1 sont inchangés pour les étapes de construction, et de rénovation. La phase de démolition est simplifiée par rapport au Chapitre 1, l'objectif étant ici de se focaliser sur les aspects prospectifs énergétiques. Les impacts engendrés par l'utilisation du bâtiment en situation présente sont recalculés pour tenir compte du changement des consignes.

Afin de considérer une méthodologie homogène sur l'ensemble du cycle de vie, le modèle du CMA est également utilisé pour l'évaluation du présent. La méthode GHG-P 10 % est appliquée pour l'évaluation de la production marginale d'électricité.

⁸⁵ À l'instar de l'étude de cas simple du chapitre 3, on considère ici l'électricité spécifique comme une source d'apport interne mais la consommation d'électricité associée n'est pas incluse dans les frontières de l'analyse du cycle de vie. On considère que la consommation d'électricité spécifique hors éclairage et ventilation ne fait pas partie du périmètre.

4.6.4. Utilisation future du bâtiment

Les consommations d'énergies sont associées aux évolutions technologiques prévues dans les scénarios A et B (décrits au paragraphe 4.3) pour calculer les impacts environnementaux de la consommation d'énergie pour le présent et les horizons moyen et long terme. Le scénario A suit une évolution type business-as-usual et le scénario B considère la mise en place d'une taxe carbone forte et l'introduction de biogaz dans le réseau de gaz.

Le Tableau 39 récapitule les besoins en énergie finale pour chacun des jalons temporels selon les deux scénarios climatiques.

Tableau 39 : Besoins énergétiques en énergie finale pour les scénarios 1 et 2

Besoins énergétiques (kWh _{EF})	Présent (RT2012)	Moyen terme (RT2012 + Clim)	Long terme (RCP+Clim)
Scénario 1	4756	5178	6208
Scénario 2	4756	5178	5329

4.6.5. Synthèse des impacts présents et futurs

Les impacts de l'utilisation d'énergie obtenue pour le présent, pour 2030 et 2050 sont pondérés pour obtenir l'impact sur l'ensemble du cycle de vie. Une durée de vie de 50 ans est considérée. L'évaluation présente est estimée valide pour une durée de 10 ans (2010-2020), l'évaluation 2030 pour 20 ans (2020-2040) et l'évaluation 2050 pour les 20 ans restants (2040-2060).

4.6.5.1. ANALYSE DE CONTRIBUTION

Les résultats par contributeurs pour la maison I-BB tout électrique sont présentés Figure 106. Même si les effets du réchauffement climatique sont sensibles (différences entre les scénarios 1 et 2), ils sont plus faibles que les effets de l'évolution de la production d'électricité (différences entre les scénarios A et B).

Les différences entre ACVA et ACVC restent similaires aux différences obtenues dans le Chapitre 3. Cependant, suivant l'approche ACVA, la prise en compte du futur fait augmenter l'impact final, quel que soit le scénario. Négliger le futur reviendrait alors à sous-estimer l'impact lorsque cette approche correspond à l'objectif de l'étude. Les résultats de l'approche ACVC sont plus mitigés : selon l'évolution future du mix électrique (A/B) les impacts seront identiques ou inférieurs à une évaluation négligeant la prospective.

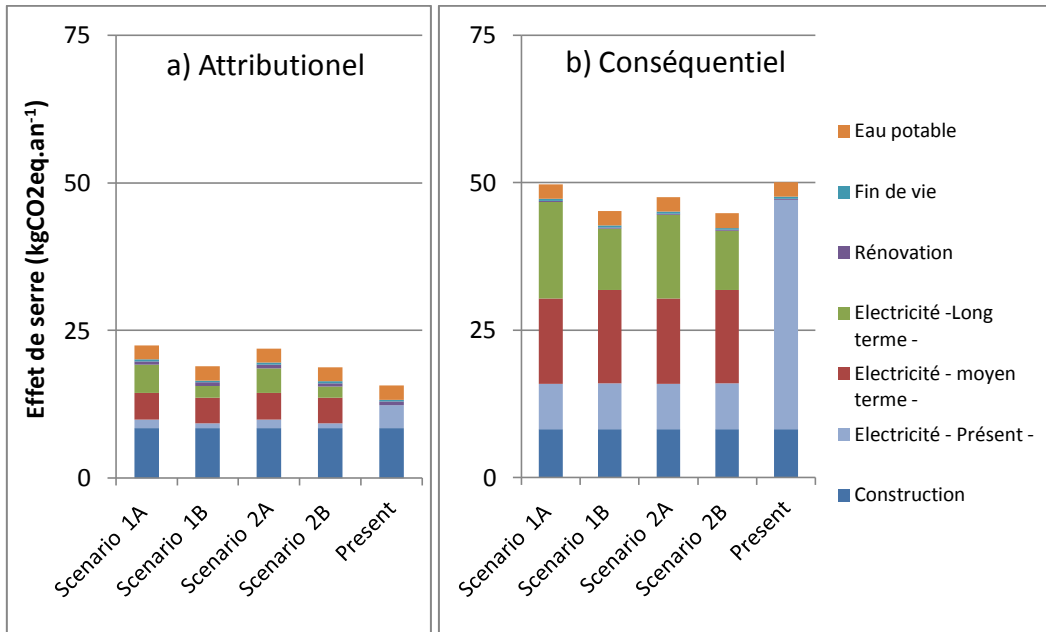


Figure 106 : Contribution à l'effet de serre pour l'ensemble du cycle de vie de la maison IBB, selon les 4 scénarios étudiés

4.6.5.2. VARIANTE CHAUFFAGE ET ECS GAZ

La Figure 107 compare la maison IBB tout électrique avec une variante gaz pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. À noter que la consommation d'électricité passe alors de 438 kWh (éclairage et ventilation) dans le cas présent à près de 2300 kWh en 2050 pour le scénario 1 (ajout de la climatisation).

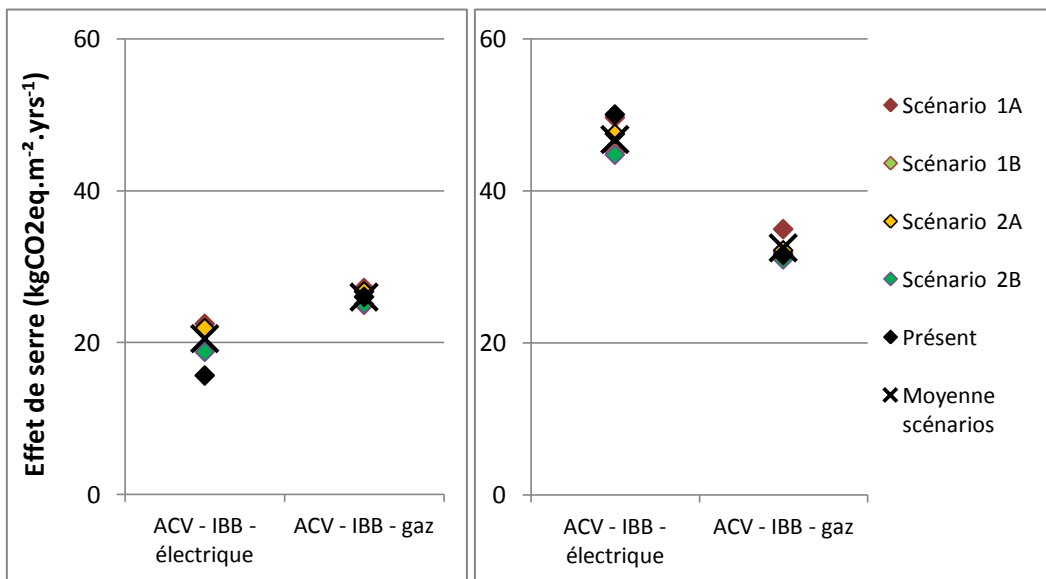


Figure 107 : Comparaison de la contribution à l'effet de serre pour les variantes gaz et électrique, selon les 4 scénarios étudiés, suivant l'approche ACVA (gauche) et ACVC (droite)

Dans le cas de l'approche ACVA, l'évaluation est favorable à la variante tout électrique. Les résultats pour la variante électricité sont plus dispersés que pour la variante gaz.

La différence entre les variantes est plus marquée avec l'approche ACVC. Comme dans le Chapitre 3, la variante gaz semble plus favorable pour cet indicateur. L'interprétation des résultats doit tenir compte du type de scénarios utilisés ici. Le mix électrique moyen utilisé dans le scénario B comporte encore plus de 8 % de centrale au charbon (avec séquestration) à l'horizon 2050. La proportion de charbon est donc majoritaire dans le mix marginal.

4.6.5.3. PRODUCTION LOCALE D'ÉNERGIE : INTÉGRATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE EN TOITURE

L'augmentation de la température diminue le rendement des cellules photovoltaïques (Skoplaki et Palyvos, 2009). Un lien entre température et rendement des cellules est considéré dans le modèle de simulation thermique dynamique utilisé (Guiavarch et Peuportier, 2006). Le système photovoltaïque installé (équivalent à 2880 Wc) est simulé dans différentes conditions météorologiques représentatives des conditions passées (RT2005), présentes (RT2012) ou futures (RCP4.5 et RCP 8.5) pour la station de Mâcon. Les résultats sont donnés à la Figure 108.

Les données RT2005 et RT2012 diffèrent à la fois pour le rayonnement et la température, mais les données de rayonnement RCP 4.5 et 8.5 sont identiques à la RT2012. On voit que selon les données météorologiques futures utilisées, une perte de rendement de 0,4 à 1 % est due à l'augmentation de température liée au changement climatique. Cependant, les effets du changement climatique sur le rayonnement solaire n'ont pas été considérés ici, en raison de la difficulté d'accès aux données nécessaires (voir cependant la discussion à ce sujet au paragraphe 4.2.3).

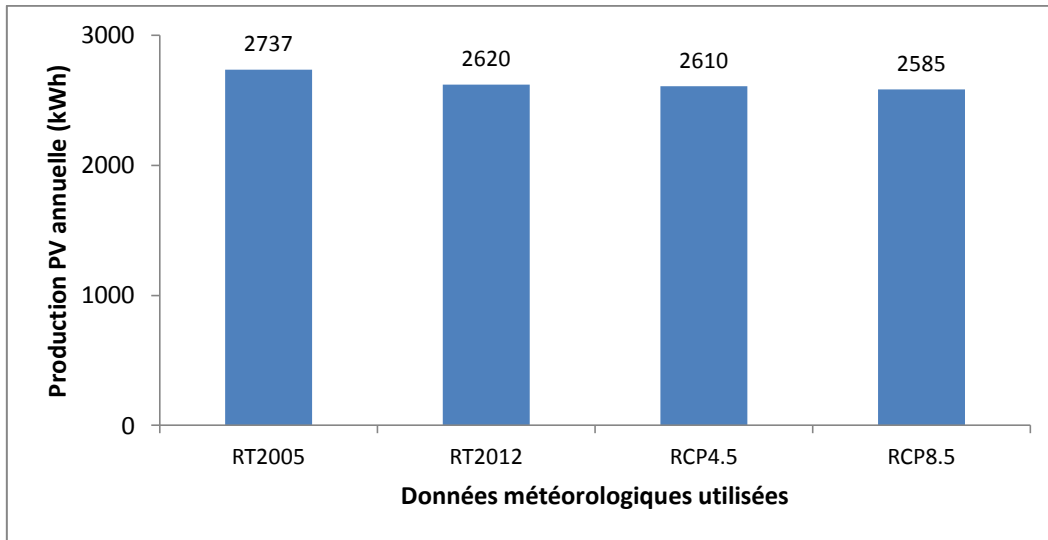


Figure 108 : Production annuelle du système PV selon les données météorologiques utilisées

Les données de production photovoltaïque sont croisées avec les données de consommation d'électricité selon les différents scénarios, ce qui donne une production autoconsommée et une production exportée différente selon les scénarios. Selon l'approche attributionnelle ou conséquentielle, les productions autoconsommée et exportée ne sont pas prises en compte de la même manière (méthode des coproduits en ACVA et méthode des impacts évités en ACVC, voir Chapitre 3). Le résultat du calcul des productions autoconsommée et exportée pour la variante I-BB tout électrique est donné à la Figure 109. Les scénarios où la production autoconsommée est la plus importante correspondent aux scénarios où la consommation de climatisation est plus élevée (horizon 2050).

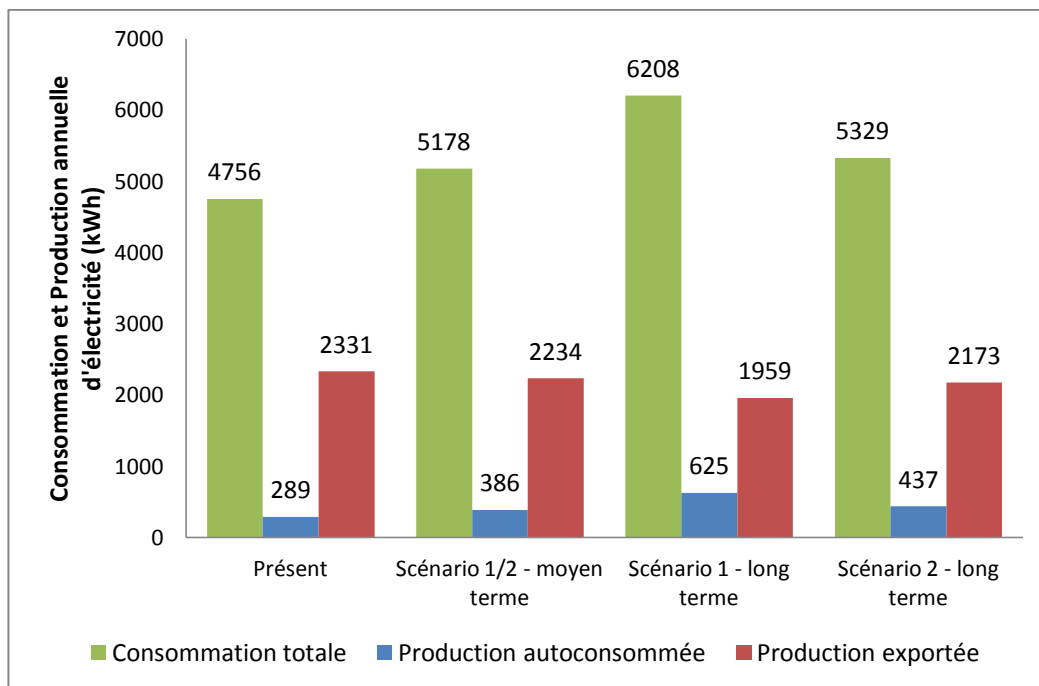


Figure 109 : Bilan de la production et de la consommation d'électricité selon les différents scénarios d'évolution climatique (1 : changement climatique fort, 2 : changement climatique contenu)

Le bilan environnemental final (sur l'indicateur d'effet de serre) de la maison I-BB tout électrique intégrant un système photovoltaïque de 2880 Wc est présenté sur la Figure 110. Il intègre la fabrication et le remplacement du système photovoltaïque pour lequel une durée de vie de 25 ans est considérée. La méthode des coproduits et les technologies moyennes de production sont utilisées pour l'approche attributionnelle ; la méthode des impacts évités et les technologies marginales de production sont utilisées pour l'approche conséquentielle.

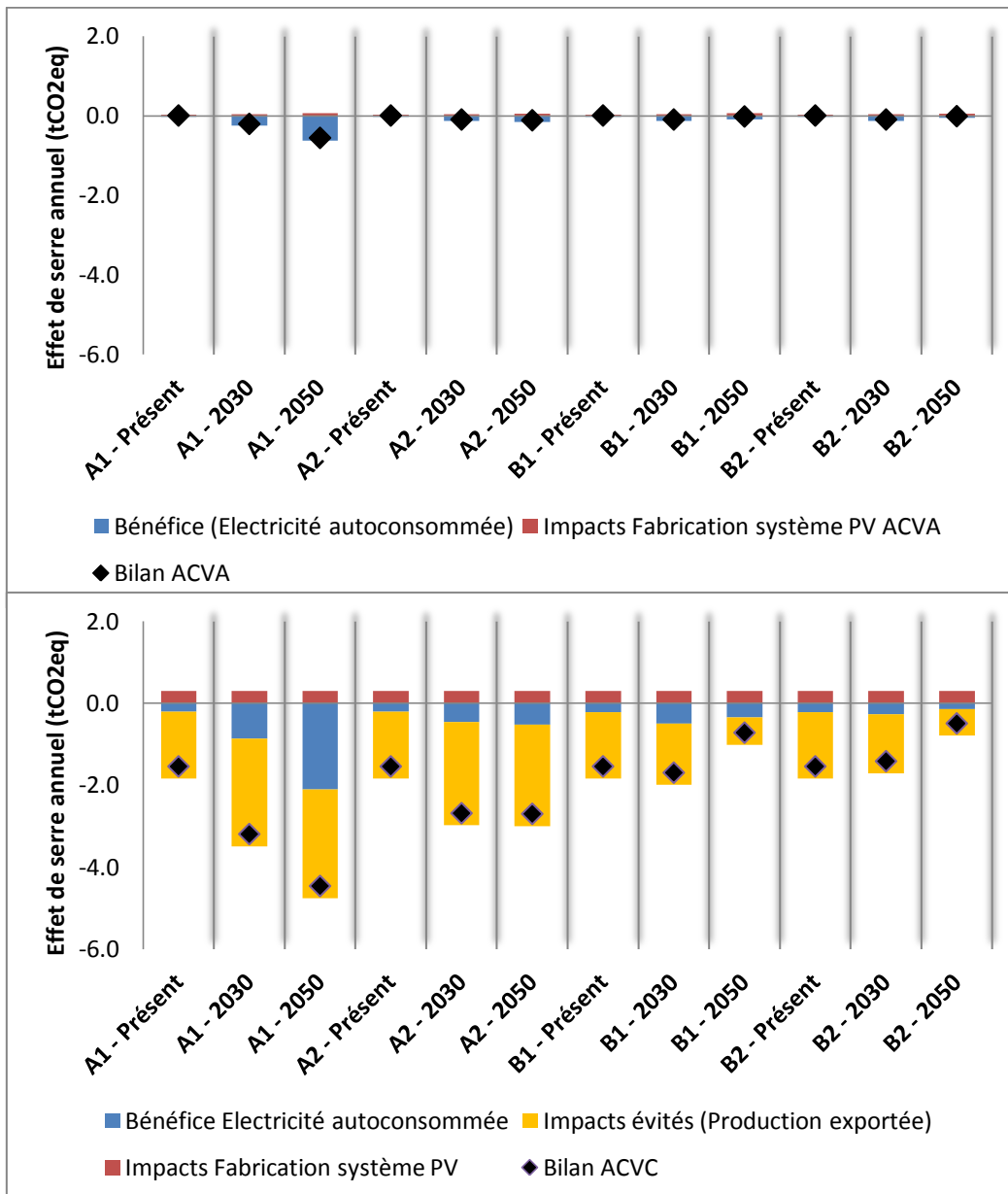


Figure 110 : Intérêt environnemental du système PV sur l'effet de serre selon l'approche choisie, ACVA (haut) ou ACVC (bas)

On retrouve des résultats similaires à ceux du Chapitre 3 : le bénéfice environnemental de la production photovoltaïque apparaît comme indéniable avec l'approche ACVC et négligeable avec l'approche ACVA. Cependant, dans l'optique d'un scénario combinant un fort changement climatique et un mix électrique de type *business as usual* (scénario A1 - 2050), l'intérêt de la production d'électricité locale est nette.

La production autoconsommée est faible : entre 6 et 10 % selon le scénario considérée (Figure 109). Les impacts de la fabrication du système photovoltaïque sont dans l'approche attributionnelle alloués au prorata de la production

autoconsommée. Cela explique la différence observée concernant les impacts générés entre l'approche attributionnelle et l'approche conséquentielle (Figure 110).

La synthèse des scénarios pour l'ensemble du cycle de vie est présentée à la Figure 111 en comparaison avec la variante de base, tout électrique et sans système photovoltaïque.

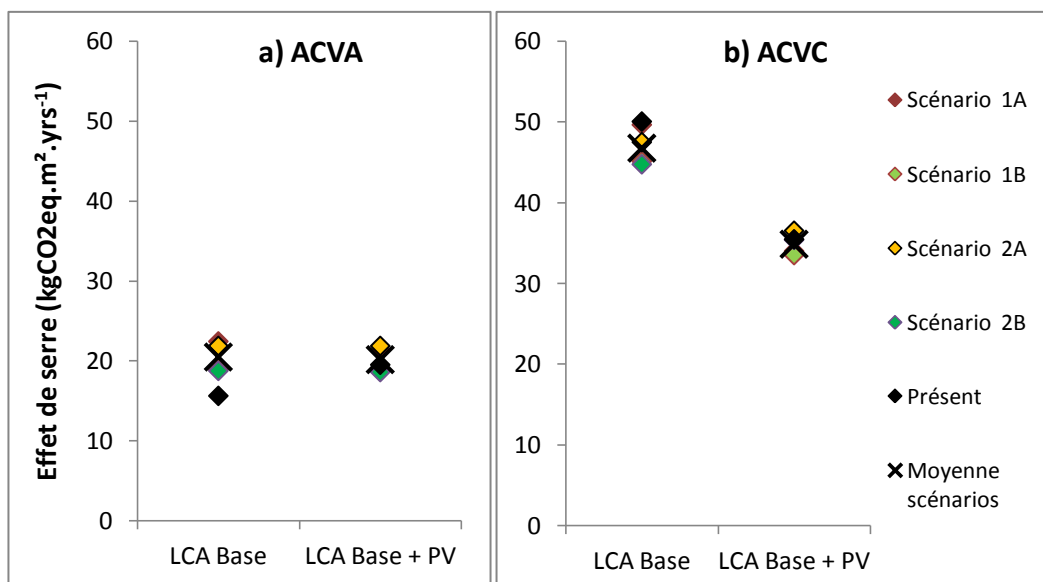


Figure 111 : Comparaison de l'effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie des variantes de base et variante avec PV pour les différents scénarios, selon l'approche ACVA (gauche) ou ACVC (droite)

En approche ACVC, on observe que l'installation de PV est toujours favorable. De plus, l'écart entre la variante de base et la variante PV est plus important dans les scénarios A par rapport aux scénarios B. Cela est dû à une part d'électricité autoconsommée plus importante dans les scénarios A en lien avec l'augmentation de la consommation de climatisation.

Les résultats de l'approche ACVA apparaissent plus mitigés sur l'intérêt d'installer des panneaux PV pour améliorer l'impact environnemental du bâtiment. Seul le cas du scénario 1A donne une amélioration sensible du bilan (baisse de 4 % par rapport à la variante de base), les autres scénarios montrent une baisse inférieure à 3 % (1 % pour les scénarios 1B et 2B, 2 % pour le scénario 2A).

Si l'on considère l'analyse prospective comme une analyse de risque sur les changements liés au futur, l'installation de panneaux photovoltaïques semble une bonne option pour améliorer l'impact du bâtiment sur l'augmentation de l'effet de serre: quel que soit le scénario ou l'approche étudiée, le bilan avec PV est identique ou meilleur que la variante de base.

4.7. CONCLUSION DU CHAPITRE

L'objectif du travail présenté est de poser les bases d'une méthodologie prospective adaptée à l'étude des bâtiments et des quartiers. La méthodologie développée est intégrable en pratique dans un outil d'écoconception bâtiment/quartier. Ce travail a vocation à être enrichi par de nouveaux scénarios, intégrant par exemple une plus importante proportion d'énergie renouvelable dans le mix électrique (Krakowski et al., 2016).

Le travail de méthodologie prospective présenté dans cette partie consolide les résultats d'analyse du cycle de vie quartier :

- Le respect de l'unité fonctionnelle, en particulier des critères de confort des occupants est étudiée sur l'ensemble de la durée de vie du projet.
- La modélisation du bâtiment en climat futur consolide l'évaluation des besoins énergétiques du projet étudié. L'augmentation potentielle des besoins de climatisation dans un contexte de réchauffement climatique est anticipée et intégrée à l'étude environnementale, évitant un déplacement de pollution dans le temps.
- Le champ des possibles introduit par les différents scénarios prospectifs consolide le choix de la meilleure variante.

Les résultats obtenus sur l'étude de cas montrent que l'introduction de la prospective peut changer de façon importante des résultats de l'ACV. Le bilan environnemental du PV en ACVA varie en fonction du scénario considéré et il est nettement plus positif sur l'ensemble des scénarios prospectifs que l'évaluation considérant seulement la situation présente. L'analyse de contribution est également impactée par l'introduction des scénarios prospectifs (p.ex. apparition de la climatisation).

L'effet du changement climatique sur l'évolution du secteur énergétique n'est pas pris en compte dans ce travail. C'est une limitation importante : le changement climatique peut engendrer une baisse des rendements des centrales thermiques, ainsi qu'une baisse à long terme des ressources en eau. Le changement climatique va également contribuer à modifier la demande en électricité, en France et dans les pays voisins, de façons différentes selon les secteurs d'activités et les pays. Les premiers résultats obtenus sur ce thème montrent premièrement que les effets sont importants et deuxièmement qu'ils vont dans le sens d'un recours accru aux énergies fossiles.

Des limitations importantes pèsent sur la modélisation des changements climatiques. Premièrement, seules les évolutions de la température ont été prises en compte. Deuxièmement, l'effet d'îlot de chaleur urbain n'a pas été intégré. Cela constitue une perspective de recherche importante à l'échelle de la ville et du quartier.

Chapitre 5. Du bâtiment au quartier : transports et déchets ménagers

5.1. INTRODUCTION

Après avoir étudié les aspects dynamiques et prospectifs sur les bâtiments, l'objectif de ce chapitre est de contribuer à l'élaboration d'une méthode conséquentielle-projet pour le quartier.

Comme souligné dans le Chapitre 1, paragraphe 1.5, les cas du transport et des déchets ménagers sont des éléments sur lesquelles des lacunes ont été observés : les techniques de modélisation conséquentielle existantes ne peuvent être directement dérivées des approches existantes : technologies marginales de production, etc.

Ce chapitre examine en détail le transport quotidien des occupants puis le traitement des déchets ménagers et pose les bases d'un cadre d'étude multidisciplinaire de l'écoconception des quartiers.

5.2. LE TRANSPORT QUOTIDIEN DES OCCUPANTS

5.2.1. *Mobilité urbaine et écoconception des quartiers*

Lors de la réalisation d'une étude ACV bâtiment ayant pour objectif l'aide à la conception, les conséquences environnementales de la mobilité des occupants sont rarement intégrées à l'étude. Or les décisions peuvent influencer fortement les besoins de transport, par exemple, lorsque plusieurs sites d'implantation sont envisageables. À l'échelle du quartier, l'aménagement des voiries, les emplacements de stationnement, la mise en place de voies douces participent des décisions de conception et influencent la mobilité quotidienne des occupants (Beirão et Sarsfield Cabral, 2007 ; Gärling et Schuitema, 2007) :

- amélioration de la qualité, de la linéarité, et de la sécurité des voies douces (Wardman et al., 2007 ; Dill et Voros, 2007) ;
- ajout d'une desserte de transport en commun, accès à une plateforme multimodale (aire de covoiturage, voitures ou vélos en libre service) ;
- nombre de places de parking disponibles, prix du stationnement ;
- multifonctionnalité et densité du quartier ;
- congestion des voies de circulation ;
- zone piétonne, zone à vitesse réduite.

À plus grande échelle, le lien entre forme urbaine et impacts du transport a été démontré de nombreuses fois (Nichols et Kockelman, 2015 ; Perkins et al., 2009).

Les différents paramètres listés ci-dessus interagissent et sont potentiellement non compatibles avec d'autres aménagements de l'espace urbain, pour des raisons de place (p. ex. jardins partagés versus plateforme multimodale) ou d'enveloppe budgétaire. Afin d'apporter une aide à la décision au planificateur urbain, il est nécessaire de pouvoir comparer ces différents leviers d'écoconception aux autres leviers disponibles lors de la conception des bâtiments eux-mêmes : effort de réhabilitation, niveau de performance énergétique des bâtiments, densité bâtie, etc.

Des outils avancés de modélisation transport existent, notamment pour la région Île de France (Leurent, 2012). Ils permettent de tenir compte de façon plus précise des spécificités du réseau de transports existant que les outils de type « calculatrice transports ». La forme urbaine, l'accès aux différents types de transports en commun, l'accès aux services, la congestion sont pris en compte de façon précise. Le travail présenté dans cette partie propose l'élaboration d'une méthodologie intégrant les résultats de modélisation de la mobilité urbaine par ces outils complexes en entrée des outils d'écoconception des ensembles bâtis (voir Figure 112).

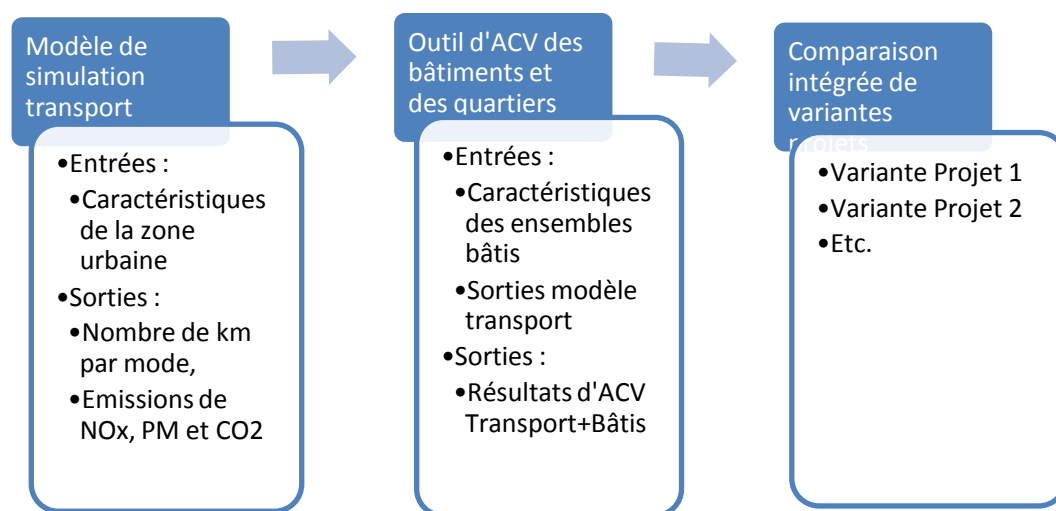


Figure 112 : Schéma général de la procédure d'intégration des outils ACV et transport

L'outil de modélisation transport dont les résultats et hypothèses ont été utilisés dans cette thèse est premièrement décrit, ainsi que les objectifs pour lesquels il est couramment utilisé. L'intérêt des approches attributionnelles et conséquentielle est discuté en fonction des objectifs de l'étude et des données

disponibles. Suit une description succincte des informations nécessaires à l'élaboration d'une étude ACV mobilité-quartier. La dernière partie présente la méthodologie proposée, permettant le couplage entre ACV et modélisation du transport.

5.2.2. Simulation de la mobilité urbaine

Le modèle qui a servi à produire les résultats utilisés est le modèle MODUS v2.2⁸⁶ développé par la DREIF⁸⁷. C'est un modèle statique macroscopique modélisant les flux de déplacement à l'échelle de l'Île-de-France, découpée en 1289 zones. L'objectif premier de ce modèle est d'analyser les déplacements à l'heure de pointe du matin (HPM) et du soir (HPS) pour anticiper les phénomènes de congestion et de saturation des transports en commun (Leurent, 2010).

Cet outil fait partie des outils dits « en 4 étapes », génération-distribution-choix modal-affectation, résumées sur le schéma de la Figure 113. L'outil a été étendu aux problématiques de pollutions locales, comme la pollution de l'air (émission de particules fines et d'oxydes d'azote) et la pollution sonore générée par le trafic routier (Vanhille, 2015).

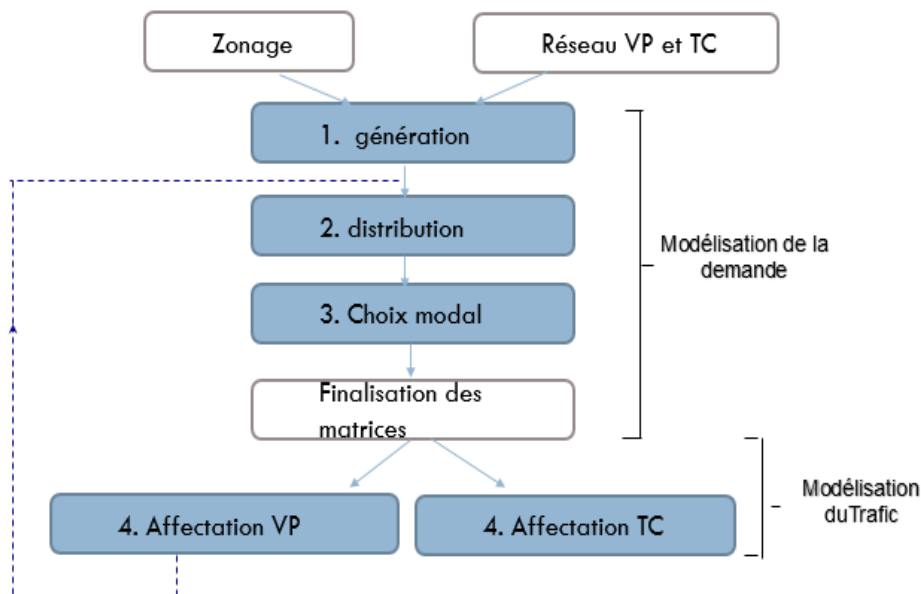


Figure 113 : Principe des outils dits "en 4 étapes", figure transmise par Natalia Kotelnikova

⁸⁶http://www.driea.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Documentation_MODUSv2-1-2_cle25e7bd.pdf.

⁸⁷ Direction Régionale de l'Équipement Ile-de-France

Le modèle est préalablement calibré à l'aide de nombreuses données de caractérisation de l'environnement urbain étudié : la zone urbaine dont fait partie le projet est découpée en sous-zones et ces sous-zones sont décrites par des paramètres concernant l'occupation du sol, les aménagements prévus, les statistiques sur les déplacements, etc. L'occupation du sol est représentée par le nombre d'attributs de chaque zone. Celui-ci est défini comme la somme de la population active résidente (PACT), de la population non active résidente (PNACT), de l'offre d'emploi totale (ETOT) et des places d'enseignement offertes sur place (PETU). Le nombre d'attributs peut s'apparenter au nombre d'usagers du quartier. L'ensemble des réseaux routiers et de transport en commun est intégré dans le modèle. En implémentant ce modèle sous le logiciel de traitement SIG⁸⁸ TransCAD⁸⁹, il est possible d'affiner l'échelle spatiale du modèle, selon l'étude réalisée (p. ex. à l'échelle du quartier ou à l'échelle de l'îlot, voir Figure 114). Une procédure permettant de réaliser ce raffinement spatial est exposée de manière détaillée dans le rapport de projet de fin d'étude d'Emilie Vanhille (Vanhille, 2015).

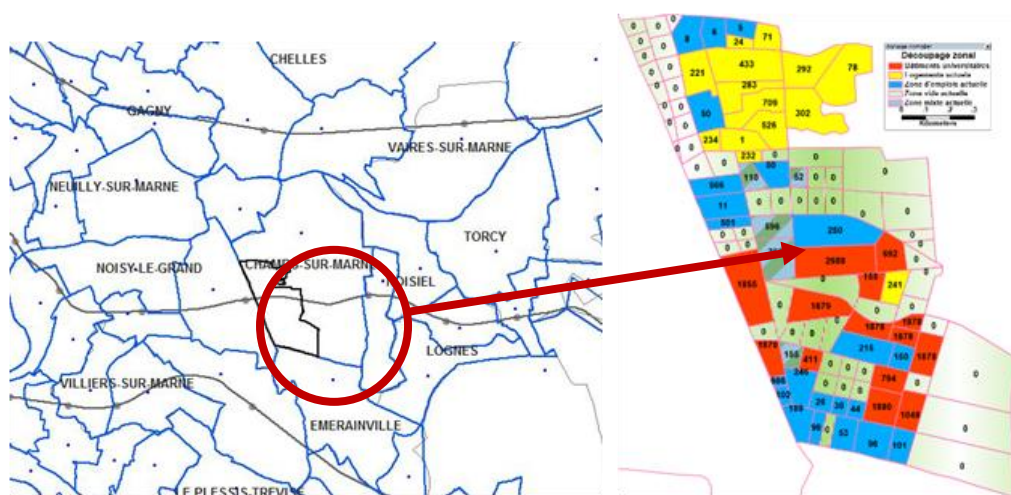


Figure 114 : Affinement spatial du modèle pour l'étude des quartiers, (Vanhille, 2015)

À partir de ces données d'entrée caractérisant le site étudié et son environnement, la première étape du modèle consiste à simuler les flux de personnes émis et reçus dans chaque zone de l'aire urbaine en fonction de l'usage du sol (étape 1. Génération). Les flux modélisés sont des flux journaliers émis ou reçus par la zone en fonction du type de motif, captif ou non-captif, du déplacement.

⁸⁸ Système d'informations géo-localisées

⁸⁹ Logiciel SIG développé par la société Caliper (<http://www.caliper.com/tcovu.htm>) et spécialisé pour l'étude des transports

La deuxième étape de modélisation apparie les origines et les destinations de chacun des flux (étape 2. Distribution) en fonction des usages associés à chaque zone et du caractère captif ou non captif des déplacements (voir Figure 115).

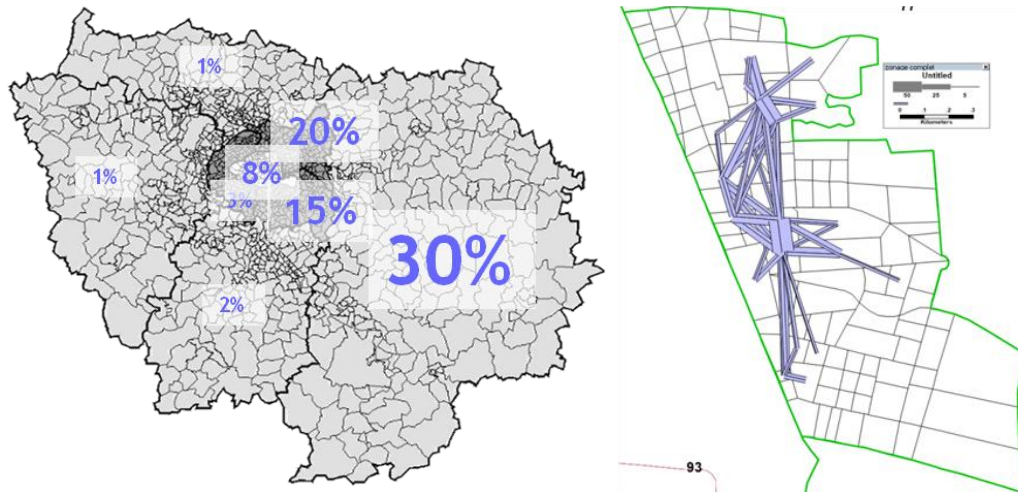


Figure 115 : Distribution des flux: sortants du quartier (gauche) ou interne (droite) au quartier, (Vanhille, 2015)

La troisième étape affecte un choix modal à chacun des déplacements. Trois choix sont possibles : modes doux (vélo, marche), véhicule particulier (VP) ou transport en commun (TC).

La dernière étape détermine les conditions de circulation en fonction du trafic généré par ces déplacements. Plusieurs itérations du modèle permettent de tenir compte de la qualité du service rendu par rapport aux conditions de trafic dans la distribution des flux. Le modèle optimise l'itinéraire de chaque flux par rapport à un arbitrage prix-temps.

Finalement, pour le quartier étudié, situé dans une certaine zone urbaine, on obtient en sortie du modèle :

- la quantité de flux émis et reçu par le quartier, ainsi que les flux traversants ;
- les vitesses moyennes de circulation sur l'ensemble du réseau routier ;
- le nombre de voyageurs en transport en commun ;
- le nombre de kilomètres effectué par les véhicules particuliers.

Pour l'ensemble des flux émis ou reçus par le quartier concerné, on peut ensuite dériver de ces informations la quantité de carburant consommée par les véhicules particuliers ou les transports en commun ainsi le nombre de km parcourus pour chacun des modes.

L'extension environnementale de l'outil donne en outre les émissions directes de CO₂, NO_x et particules fines (PM) par jour en fonction de la vitesse (pour les

véhicules particuliers) et des caractéristiques du parc automobile (p. ex. véhicule type actuel à 70 % diesel et 30 % essence). Un exemple de résultat pour les émissions locales de NO_x en Île-de-France est donné à la Figure 116. Le modèle permet une spatialisation des flux de polluants locaux émis.

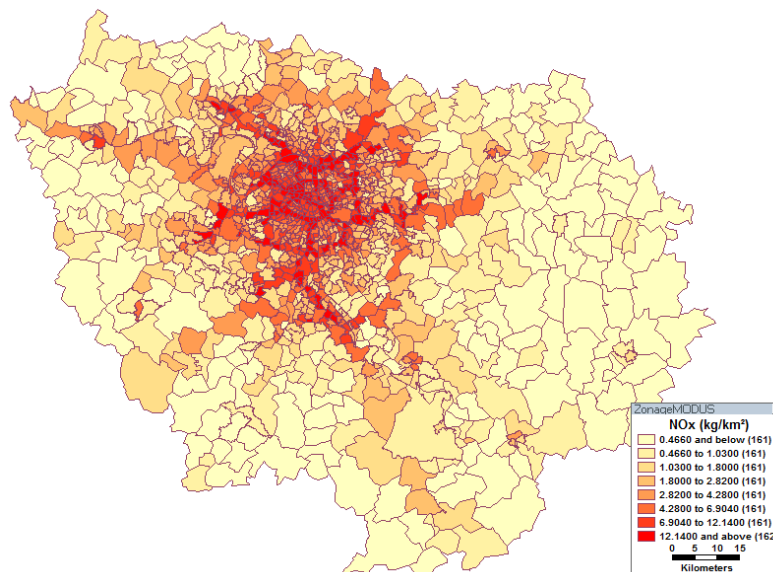


Figure 116 : Évaluation des émissions de NO_x générées par les flux d'un quartier en Île de France, (Vanhille, 2015)

La Figure 117 montre les émissions de NO_x des véhicules particuliers en fonction de leur vitesse. Pour les véhicules diesel actuels (2007) les émissions de NO_x varient du simple au double en fonction de la vitesse.

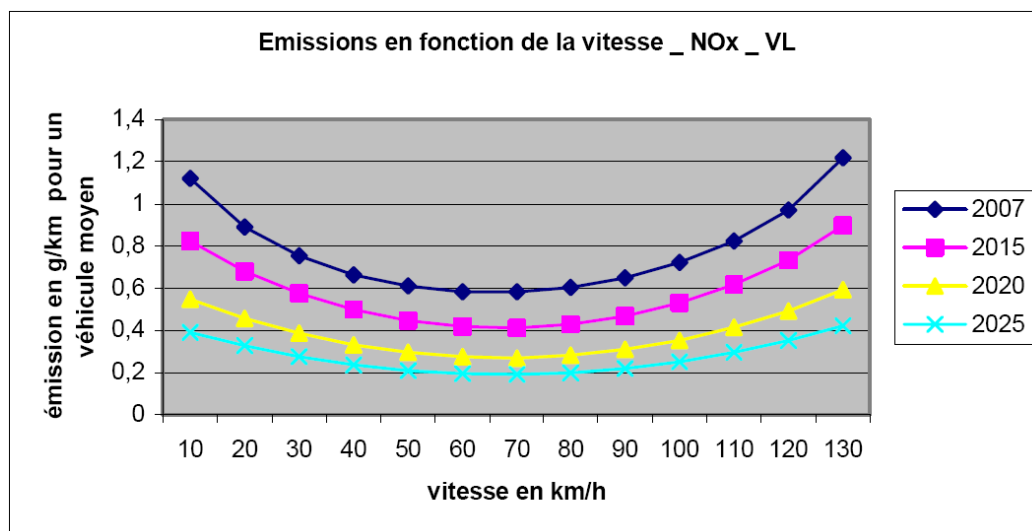


Figure 117 : Émissions de NO_x des VP diesel en fonction de la vitesse, source (SETRA, 2009)

Les avantages de l'utilisation d'un modèle spécifique de simulation transport peuvent être synthétisés en 3 points principaux :

- évaluation précise de l'accessibilité du site, possibilité de tester différents scénarios d'aménagement urbain ;
- évaluation précise de la distance parcourue par mode pour les différentes sous-zones urbaines dont fait partie le projet étudié ;
- prise en compte des phénomènes de congestion pour le calcul des émissions locales de polluants (NO_x, CO₂, particules fines) et spatialisation des émissions.

5.2.3. Couplage simulation transport-ACV

5.2.3.1. CADRE GENERAL DE L'ACV MOBILITÉ

Les impacts environnementaux des différents modes de transports de passagers ont été largement étudiés en analyse du cycle de vie : voiture individuelle (Spielmann et Althaus, 2007), bus (Cooney et al., 2013 ; Ercan et Tatari, 2015), train et même vélo ou scooter électrique (Del Duce, 2011). Les résultats sont généralement exprimés par kilomètre parcouru ou par « passager.kilomètre », selon le mode de transport (individuel ou collectif). À cette unité fonctionnelle sont associés des impacts directs (p. ex. polluants émis lors de la combustion du carburant, usure des pneus) et des impacts indirects (p. ex. fabrication et maintenance des véhicules et des infrastructures routières, production du carburant).

La Figure 118 présente l'arbre des procédés du transport VP (véhicule particulier). En plus d'une évaluation précise du nombre de km parcourus par mode, la consommation de carburant, les émissions directes de CO₂ et les émissions réglementées (NO_x, particules fines) sont accessibles grâce au modèle de transport. Le modèle n'est cependant pas suffisant pour évaluer l'ensemble du cycle de vie associé au transport : il faut compléter les émissions directes et ajouter les émissions et consommations de ressources indirectes à l'inventaire.

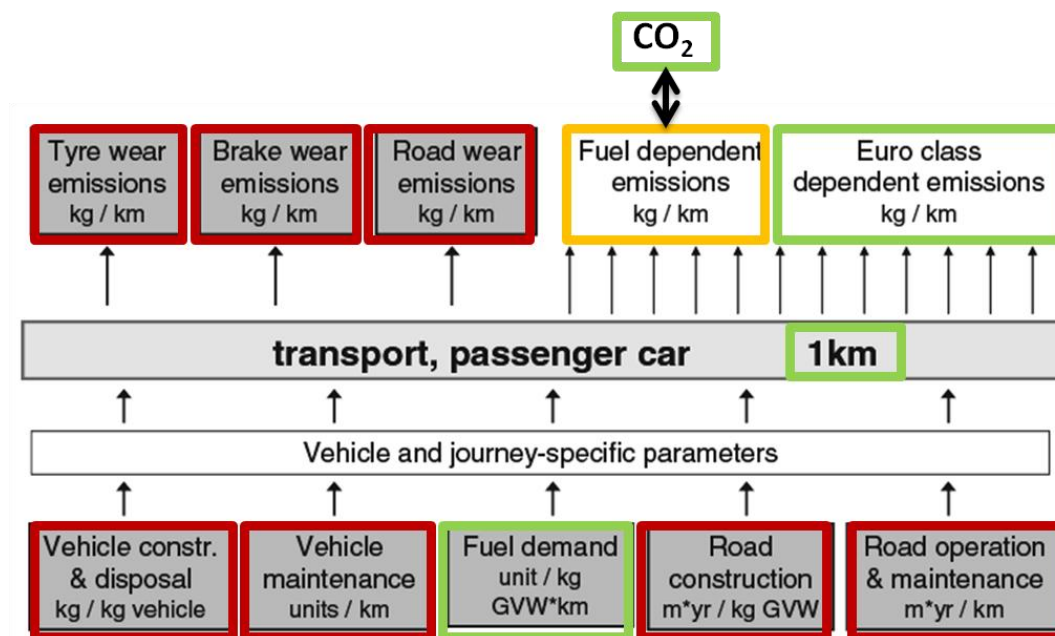


Figure 118 : Structure de la modélisation du transport voiture dans ecoinvent v3 adapté de (Simons, 2013) et données accessibles (vertes), partiellement accessibles (orange) ou non accessibles (rouge) grâce au modèle de simulation transport

Dans la suite, les modes doux (vélo, marche) sont négligés pour deux raisons principales :

- ils ne sont pas accessibles de façon différenciée dans le modèle de transport utilisé ;
- l'impact du vélo par km parcouru est faible par rapport aux autres modes de transport (Del Duce, 2011).

5.2.3.2. OBJECTIF DE L'ÉTUDE ET APPROCHE DE MODÉLISATION

Le périmètre d'étude de l'ACV mobilité-quartier va dépendre de l'objectif de l'étude. Un objectif de « diagnostic-mobilité quotidienne » cherchant à déterminer une empreinte mobilité (quotidienne) par habitant par exemple ne sera pas abordé de la même façon qu'un objectif d'écoconception d'un projet à l'échelle du quartier ou encore d'un projet de développement urbain à l'échelle de la ville. L'ensemble de ces approches ont en commun la focalisation sur la mobilité « quotidienne », qui exclut donc les déplacements relatifs aux périodes de vacances.

La Figure 119 montre ces trois grandes orientations possibles, la nature attributionnelle ou conséquentielle correspondante et les frontières du système à considérer.

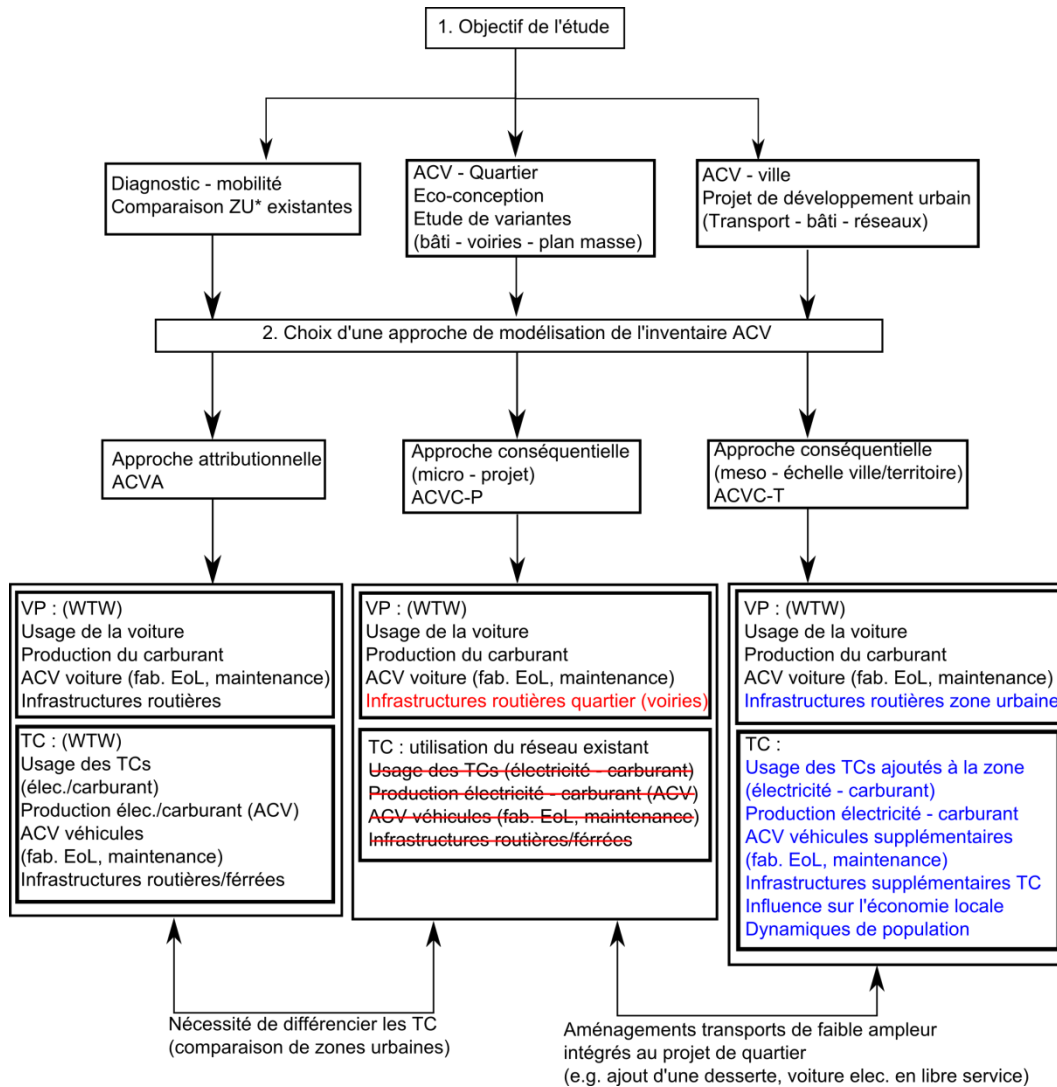


Figure 119 : Objectifs de l'étude et frontières du système pour une ACV-mobilité

Diagnostic mobilité : l'approche attributionnelle (ACVA)

Le diagnostic mobilité correspond à la réalisation d'un bilan actuel, passé ou projeté de l'ensemble des impacts environnementaux associés aux déplacements quotidiens des usagers d'une zone urbaine, d'un quartier, ou d'un bâtiment. L'ensemble des infrastructures utilisées par ces usagers doit être pris en compte. Les infrastructures routières ou les réseaux de transport en communs sont donc associés à l'étude. Un diagnostic de ce type permet par exemple d'analyser la contribution de la mobilité dans l'ensemble des impacts environnementaux par rapport aux autres thématiques comme l'alimentation, le logement, le traitement des déchets, etc. Il peut aussi mettre à jour des écarts à la moyenne importants pour certaines zones urbaines, par exemple si le taux de remplissage des bus est très bas, ce qui donne un impact par passager.km élevé. La réalisation d'un tel diagnostic peut être contextualisée grâce à l'utilisation du

modèle de transport ou du type de zone étudié (centre urbain, zone rurale), ce qui améliore la précision et le réalisme des résultats obtenus.

Ecoconception des quartiers : l'approche conséquentielle-projet (ACVC-P)

Un objectif d'écoconception des quartiers implique une *nature* conséquentielle de l'étude. L'approche appelée « conséquentielle-projet » dans cette thèse consiste à déterminer les conséquences de l'ajout d'un quartier sur l'environnement urbain dans lequel il va être réalisé. Les décisions de conception qui peuvent être prises concernent les voiries, l'organisation spatiale du quartier (zonage, plan masse), les bâtiments (principes constructifs, performances énergétiques). Ces aménagements peuvent influencer la mobilité des occupants et notamment la répartition entre usagers des transports en communs et utilisation d'un véhicule particulier (voir paragraphe 5.2.1).

Le fait que des transports soient « évités ou créés » par le transfert de ménages de leur localisation précédente vers le nouveau quartier n'est pas pris en compte. Ces « transports évités ou créés » seront identiques pour toutes les variantes de conception et ne sont pas liés à des éléments de décision à l'échelle du quartier, à partir du moment où la réalisation du programme n'est pas mise en question (le projet va être réalisé, l'objectif est de choisir entre différentes variantes de conception du même projet).

Au sujet de l'intégration des infrastructures, à l'instar de la consommation d'électricité, plusieurs hypothèses de modélisation peuvent être faites :

- L'utilisation des infrastructures existantes peut être considérée comme « gratuite » au sens de l'ACV (aucun impact associé). Si un occupant du nouveau quartier monte dans le bus, la variation des impacts du bus avec ou sans cet occupant peut être considérée comme négligeable.
- L'utilisation des infrastructures existantes implique leur maintien et leur renouvellement. De la même façon qu'en ACVA, une part de fabrication, maintenance et fin de vie des infrastructures peut être associée à chaque utilisation de ces infrastructures.

Dans le cas où plusieurs sites d'implantation du projet sont possibles, la performance des transports en commun associée à chaque zone est un facteur de différenciation entre les sites. L'usage et les infrastructures associés aux transports en commun peuvent être intégrés avec une approche de modélisation similaire à l'approche attributionnelle.

Dans le cas où le site d'implantation est fixé, la première option, excluant les transports en commun existant des frontières du système, correspond aux conséquences réelles de l'implantation du projet dans la zone. Les voiries et infrastructures routières réalisées dans le cadre du projet de quartier sont par contre intégrées à l'étude environnementale.

Écoconception des quartiers : l'approche conséquentielle-territoire (ACVC-T)

Les projets d'aménagement du territoire ont un périmètre d'action dépassant l'échelle du quartier. L'évaluation environnementale de ces projets complexes peut être réalisée à l'échelle locale (étude d'impact) ou à travers une méthodologie d'analyse du cycle de vie. Là encore, l'examen d'un projet de développement urbain correspond bien à une étude de *nature* conséquentielle.

Cependant, l'échelle méso et non plus micro (quartier) peut nécessiter de tenir compte de conséquences supplémentaires :

- Influence sur le marché de l'immobilier : une étude a par exemple intégré ces effets dans le cadre de la réhabilitation de sols pollués (Lesage et al., 2007).
- Influence sur les dynamiques de population (relocalisation par rapport au bassin d'emploi, gentrification, etc.).

La quantification des impacts environnementaux liés à ces conséquences peut être complexe car ils impliquent des marchés économiques. L'utilisation de méthodes ACV hybrides intégrant les tableaux économiques peut alors être nécessaire (Annexe A).

Les paragraphes suivants décrivent la méthodologie proposée pour construire une analyse de cycle de vie intégrant la mobilité urbaine. L'ensemble des composants pouvant être inclus est traité (p. ex. infrastructures routières) bien que leur intégration effective au périmètre de l'étude dépende des objectifs de l'étude.

5.2.3.3. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX PAR MODES : ÉQUATION GÉNÉRALE

Pour chaque type de transport X (VP diesel, VP essence, TC1 –ferré électrique- ou TC2 – bus-), les impacts peuvent s'exprimer comme la somme :

- des impacts directs liés aux émissions directes ;
- des impacts indirects liés à la fabrication des véhicules, à la fabrication du carburant et aux infrastructures.

L'ensemble des données utilisées est classé dans le Tableau 40 selon le mode de transport associé et selon leur source :

- sorties directes du modèle de transport ;
- base de données ACV (ecoinvent v3.2) ;
- paramètres annexes, issus de données statistiques ;
- données manquantes à calculer.

Tableau 40 : Récapitulatif des données utilisées

	Véhicule particulier (VP)	Transport en commun (TC1 et TC2)
Sortie Modèle Transport	Émissions directes de CO ₂ , NO _x , PM Nombre de km	Nombre de km par mode Nombre total d'attributs de la zone ⁹⁰
Base de données ACV	Émissions directes « Autres », par km (diesel, essence) Impacts des infrastructures routières (en m.an) Impacts de la production de « carburant » (diesel, essence, gaz naturel, électricité)	Impact par passager.km par mode de transport (incluant la production maintenance des véhicules et les infrastructures routières ou ferroviaires)
	Impacts de la production/maintenance d'un véhicule (essence ou diesel) Quantité d'infrastructures routières par km parcouru	
Paramètres annexes	Durée de vie VP Composition du parc (essence, diesel, électrique) Poids moyen d'un véhicule Taux de remplissage	Composition du parc (diesel, gaz, électrique)
Données manquantes à calculer	Nombre de VP équivalent annuel Quantité d'essence Quantité de diesel	Quantité d'électricité Mix électrique

5.2.3.4. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES VÉHICULES PARTICULIERS

Calcul de la part liée aux émissions directes

Le modèle de transport calcule seulement les émissions directes de dioxyde de carbone (CO₂), d'oxydes d'azote (NO_x) et de particules fines (PM). Or, de nombreuses substances sont émises lors de la combustion de carburant, comme le monoxyde de carbone et des hydrocarbures imbrûlés.

La base de données ecoinvent v3 comptabilise l'émission directe dans l'air de 38 composés différents lors de la combustion du diesel dans un véhicule

⁹⁰ Voir définition page 267

particulier, dont les 3 évalués par le modèle de transport. Les émissions sont classées en cinq groupes principaux :

1. les émissions de gaz d'échappement proportionnelles à la consommation de carburant (CO₂, SO₂ métaux lourds, etc.) ;
2. les échappements « régulés » (NO_x, particules fines, monoxyde de carbone) ;
3. les hydrocarbures spécifiques (méthane, toluène, formaldéhydes, etc.) ;
4. les autres émissions de gaz d'échappement : protoxydes d'azote, ammoniac, hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAH) ;
5. les émissions ne provenant pas des gaz d'échappement : usure des pneus, usure des plaquettes de freins, usure de la route.

La représentativité des trois polluants pris en compte dans le modèle de transport a été testée par rapport aux indicateurs environnementaux calculés pour l'ACV des bâtiments. Premièrement, la contribution des émissions directes (« *car operation* ») par rapport aux autres étapes du cycle de vie est présentée à la Figure 120.

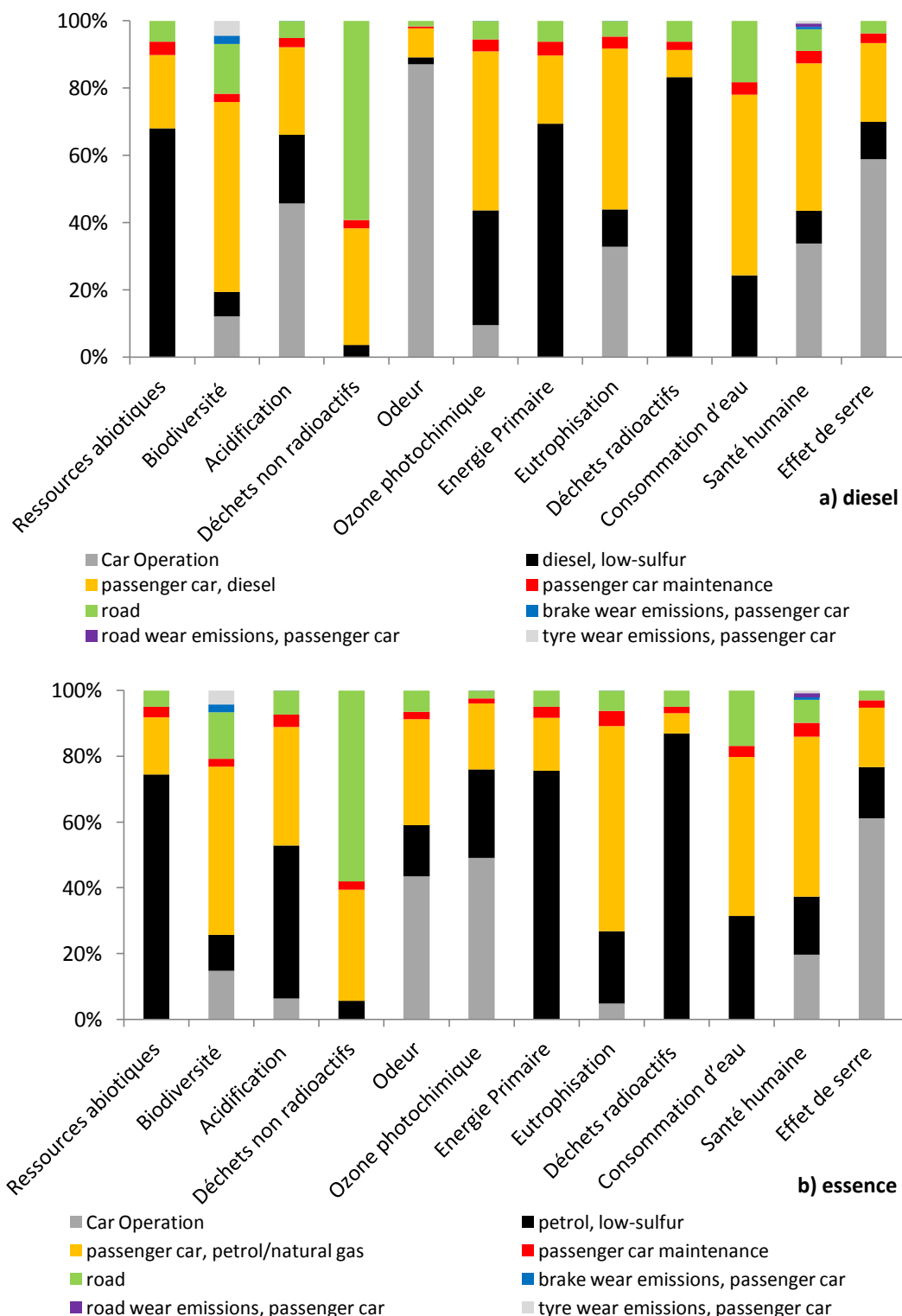


Figure 120 : Contribution des différentes étapes du cycle de vie pour une petite⁹¹ voiture diesel (haut) et essence (bas) EURO 3, méthode Eco-indicator 99, source : ecoinvent v3.2

⁹¹ Une petite voiture dans ecoinvent v3 correspond à une voiture de 1,2 t avec une cylindrée inférieure à 1,4 L. Deux autres tailles de voiture existent : moyenne (poids : 1,6 t et cylindrée entre 1,4 et 2,0 L) et grande (poids : 2 t, cylindrée > 2,0 L)

Selon la problématique environnementale étudiée, les émissions directes ont plus ou moins d'importance. Elles représentent la majorité des émissions de gaz à effet de serre (autour de 60 %), et de 21 % (essence) à 34 % (diesel) de la contribution aux dommages à la santé humaine.

Parmi ces émissions directes (« Car Operation » dans la Figure 120), la représentativité des émissions de CO₂, NO_x et particules fines par rapport à l'ensemble des substances prises en compte dans une base de données ACV comme ecoinvent a été analysée (voir Figure 121). Seuls les indicateurs pour lesquels la contribution des émissions directes n'est pas nulle sont pris en compte. La représentativité de ces polluants (CO₂, NO_x, PM) dans les émissions directes est supérieure à 90 % pour l'effet de serre (diesel et essence), la santé humaine, la biodiversité et l'eutrophisation (diesel). Dans les autres cas, ce sont principalement les composés organiques volatiles (COV) et les métaux lourds (non inclus dans le modèle de transport) qui ont une contribution non négligeable (ozone photochimique notamment pour les COV). L'indicateur d'odeur est un cas particulier, une seule substance couvre la quasi-totalité de l'impact : l'acétaldéhyde qui est perçu même à très faible dose par l'odorat humain, cet indicateur n'est donc pas représenté dans la Figure 121.

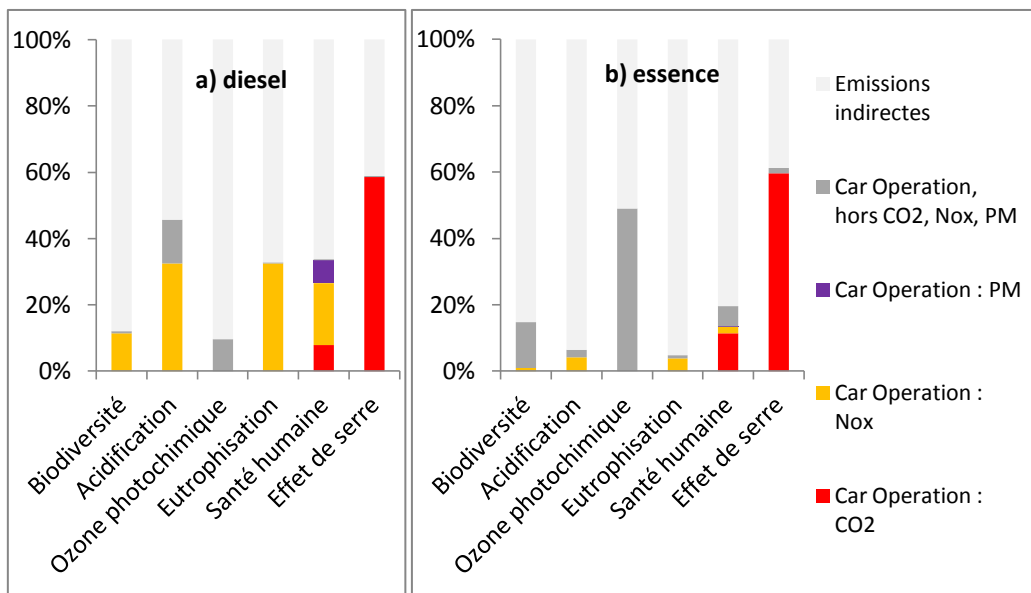


Figure 121 : Part des émissions directes et part des Nox, PM et CO₂ dans l'impact total pour une voiture essence (a) et une voiture diesel (b)

Dans l'ensemble, les trois substances mesurées par le modèle de transport couvrent de manière satisfaisante les émissions directes, sauf pour la création d'ozone photochimique. Cependant, une part importante de l'impact total est négligée car les émissions proviennent d'autres étapes du cycle de vie, non incluses dans le modèle (p.ex. fabrication des véhicules, production du carburant).

Deux niveaux de correction des impacts liés aux émissions directes peuvent être proposés :

- Un réajustement simple des seules émissions directes calculées par le modèle de transport, selon l'équation suivante :

$$I_{\text{car.km,model}} = I_{\text{car.km,ecoinvent}} + CF_{\text{CO}_2,\text{NO}_x,\text{PM}} \times (E_{\text{cFR}} - E_{\text{cCH}}) \quad 5-1$$

Où $I_{\text{car.km}}$ est le vecteur des impacts, $CF_{\text{CO}_2,\text{NO}_x,\text{PM}}$ représente la matrice des facteurs de caractérisation pour les trois substances du modèle de transport (CO₂, NO_x, PM) sur les indicateurs environnementaux calculés. E_{cFR} et E_{cCH} représentent respectivement les taux d'émissions (de CO₂, NO_x et PM) par km dans le modèle de transport (FR) et dans l'inventaire suisse (ecoinvent, CH). Les facteurs de caractérisation sont disponibles en Annexe M.

- Un réajustement plus complet tenant compte de l'ensemble des composés émis. En fonction du groupe auquel appartient la substance manquante, un réajustement spécifique de l'inventaire de la base de données ACV est proposé dans le Tableau 41. Ce réajustement est en particulier nécessaire dans le cas où les émissions de CO₂ par km parcouru sont très différentes entre ecoinvent et les résultats du modèle de transport. En effet, une partie des émissions négligées sont des composés émis lors de la combustion du carburant et leur taux d'émission varie donc linéairement avec celui du CO₂.

Tableau 41 : Détermination de l'inventaire des émissions directes à partir de la base de données ecoinvent v3.2 et du modèle de transport

	Caractéristiques	Réajustement proposé
Groupe 1	Les émissions de gaz d'échappement proportionnelles à la consommation de carburant (e.g. CO ₂ , SO ₂ métaux lourds, etc.),	CO ₂ : Modèle de transport Autres : Ajustement au prorata de la quantité de CO ₂ direct émise par km dans le modèle de transport. Dépend du combustible (diesel ou essence)
Groupe 2	Les échappements « régulés » (e.g. NO _x , particules fines, monoxyde de carbone)	NO _x et PM : modèle de transport Monoxyde de carbone : par km en fonction de la norme EURO
Groupe 3	Les hydrocarbures spécifiques (méthane, toluène, formaldéhydes, etc.)	Ajustement au prorata de la quantité de CO ₂ direct émise par km dans le modèle de transport. Dépend du combustible (diesel ou essence)
Groupe 4	Autres émissions de gaz d'échappement : protoxydes d'azote, ammoniac, hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAH)	Ajustement au prorata de la quantité de CO ₂ direct émise par km dans le modèle de transport. Dépend du combustible (diesel ou essence)
Groupe 5	Les émissions ne provenant pas des gaz d'échappement : usure des pneus, usure des plaquettes de freins, usure de la route	Par km parcouru, dépend de la taille du véhicule, ne dépend pas du combustible

Afin de procéder au réajustement proposé, il est nécessaire de déterminer la part des normes EURO et la taille des véhicules considérés dans le modèle de transport. La taille de la voiture influence de façon importante la consommation du véhicule, comme le montre la Figure 122 adaptée de la base de données ecoinvent. Les émissions de particules fines (PM) par km dépendent de la norme EURO, mais peu de la taille du véhicule (Figure 122).

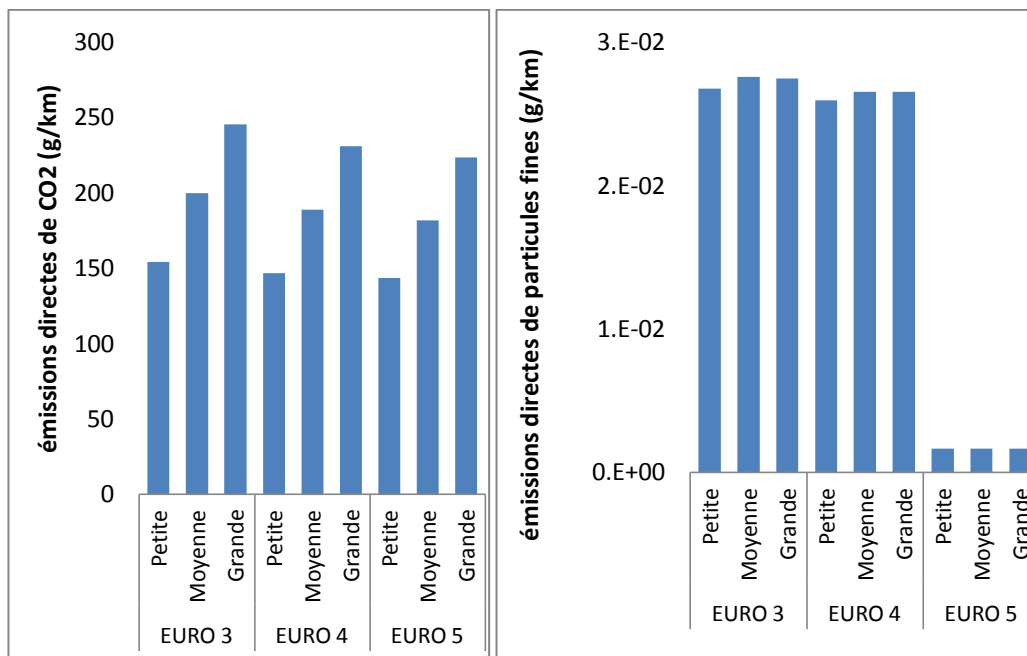


Figure 122 : Émissions directes de CO₂ et de particules fines en fonction de la taille et de la norme du véhicule (données extraites de la base ecoinvent v3.2). Véhicule type considéré : 70 % diesel, 30 % essence

La norme EURO du véhicule est choisie à partir des émissions de particules fines par kilomètre données en sortie du modèle en considérant un mix EURO 3/EURO 5. La base de données ecoinvent v3 distingue trois tailles, petite, moyenne ou grande, en fonction du poids (1,2 – 1,6 et 2 t) et de la cylindrée des véhicules (<1,4 L ; entre 1,4 et 2,0 L ; >2,0 L). La taille des véhicules est ensuite déterminée à partir du parc existant ou prévu. Des études existantes pour le parc des véhicules particuliers en France permettent d'estimer à 2025 une proportion d'environ 60 % de véhicules de petite ou moyenne taille (cylindrée inférieure à 2 L) et 40 % de véhicules de grande taille (Hugrel et Joumard, 2004, p. 25). À partir de ces données, les émissions de monoxyde de carbone et les émissions du groupe 5 (émissions hors gaz d'échappement) peuvent être déterminées par la procédure de réajustement et ajoutées à l'inventaire.

Calcul de la part liée à la fabrication des véhicules particuliers

La base de données ecoinvent v3 fournit un inventaire par kg de véhicule ainsi qu'un inventaire de maintenance par unité de véhicule. Le poids moyen du véhicule type est calculé à partir de sa taille telle que définie au paragraphe précédent. Une voiture de petite taille pèse 1,2 t dans la base de données ecoinvent, contre 1,6 t pour une taille moyenne et 2 t pour un véhicule de grande taille. L'ajout d'une unité de maintenance donne l'impact par véhicule particulier.

Il reste ensuite à déterminer le nombre de véhicules concernés par an. Le nombre de véhicules particuliers annuels concernés est estimé à partir du nombre de km effectués par l'ensemble des véhicules (résultat du modèle de transport) N_{VP-km} et d'une durée de vie kilométrique par véhicule DV_{km} de 150 000 km, soit :

$$N1_{VP} = \frac{N_{VP-km}}{DV_{VP-km}} \quad 5-2$$

Calcul de la part liée aux carburants des véhicules particuliers

La base de données ecoinvent v3 fournit des inventaires pour la production d'un kilogramme de diesel ou d'essence, tous deux à basse teneur en soufre. La quantité totale de carburant associée à ces inventaires est calculée à partir des caractéristiques du parc de véhicules (p. ex. 70 % diesel et 30 % essence) et de la quantité de CO₂ émise par kilomètre, celle-ci étant proportionnelle à la quantité de carburant consommée. La base de données ecoinvent donne un ratio de 0,319 kg de carburant par kg de CO₂ émis pour les véhicules diesel et 0,315 pour les véhicules essence. Ce ratio est indépendant de la taille et de la norme EURO des véhicules.

Calcul de la part liée aux infrastructures de transport

La base de données ecoinvent v3 donne pour les véhicules particuliers en Europe une utilisation de 0,9114 km.année de route par kilomètre parcouru. Ce chiffre est repris dans cette étude pour l'intégration des impacts liés aux infrastructures pour les véhicules particuliers, faute de données plus précises sur la situation française.

5.2.3.5. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES TRANSPORTS EN COMMUN

Les transports en commun sont séparés en deux catégories : ferrés électriques (métro, trains, tramway) ou bus. Il est possible qu'une partie de la flotte de bus soit électrique, selon les hypothèses prises pour le parc à l'horizon 2030. En fonction du mode de transport, on sélectionne un procédé qui le représente dans la base ecoinvent v3. La correspondance entre les modes de transport du modèle et la base de données environnementale est détaillée dans le Tableau 42. Certains inventaires sont ensuite réajustés pour mieux correspondre à la situation française/francilienne. Les réajustements proposés sont décrits dans les paragraphes suivants.

Tableau 42 : Correspondance entre le mode de transport et ecoinvent pour les TC

Mode de transport	Procédé associé de la base ecoinvent v3
Bus	transport, regular bus [CH]
Méto	transport, passenger train, urban [CH]
RER	transport, passenger train, urban [CH]
Tramway	transport, tram [CH]

Calcul de la part liée à la consommation d'électricité pour les transports électriques

Pour les modes de transports en commun électriques, seules les émissions de CO₂ sont comptabilisées dans le model de simulation de la mobilité, sur la base d'une valeur fixe de 53 gCO₂/kWh consommé. Les autres émissions liées à la production d'électricité ne sont pas intégrées. De plus, la valeur de 53 gCO₂/kWh ne correspond pas forcément à la même méthodologie que celle appliquée en analyse de cycle de vie des bâtiments et des quartiers. Sur ce point, plusieurs méthodologies sont détaillées dans le Chapitre 3.

À partir du nombre de kWh d'électricité consommé par passager.km pour chacun des modes électriques (donnée extraite de ecoinvent v3), les impacts environnementaux sont recalculés en utilisant un mix annuel moyen ou marginal. Ce calcul peut être basé sur le modèle développé au Chapitre 2 et les méthodologies détaillées dans le Chapitre 3.

Calcul de la part liée aux émissions directes pour les transports thermiques

Le model de simulation-transport considère des émissions fixes de NO_x, de PM et de CO₂ par km parcouru en bus (resp. 25,6 g, 72,9 mg et 1717,3 g) pour une consommation de carburant de 666,3 g.km⁻¹. La base de données ecoinvent considère pour un bus diesel classique (suisse) un taux d'émission au kilomètre de 13,1 g de NO_x, 0,41 g de PM et 1109,6 gCO₂ pour une consommation de 349,8 g de carburant. Les valeurs prises en compte les bus dans le model de simulation de la mobilité urbaine sont très différentes de celles considérées dans la base ecoinvent car adaptées à la flotte de bus francilienne.

L'inventaire d'impact disponible dans la base de données environnementale (ecoinvent v3) pour les bus est donné par passager.km. Le taux de remplissage considéré dans ecoinvent est de 12,3 passagers. La multiplication de l'inventaire d'impact par ce taux de remplissage permet d'obtenir un inventaire par bus.km pour la base de données ecoinvent.

Sur la base de cet inventaire ($I_{\text{bus.km,ecoinvent}}$), les émissions directes de CO₂, NO_x et PM par bus.km sont ajustées par rapport aux taux d'émission donnés par le

modèle de transport. Le vecteur d'impacts tenant compte de cette première correction $I_{\text{bus.km,model,c1}}$ est donné par l'équation suivante :

$$I_{\text{bus.km,model,c1}} = I_{\text{bus.km,ecoinvent}} + CF_{\text{CO}_2,\text{NO}_x,\text{PM}} \times (Eb_{\text{FR}} - Eb_{\text{CH}}) \quad 5-3$$

où $CF_{\text{CO}_2,\text{NO}_x,\text{PM}}$ représente le vecteur des facteurs de caractérisation pour les trois substances du modèle de transport (CO_2 , NO_x , PM) sur les indicateurs environnementaux calculés. Eb_{FR} et Eb_{CH} représentent les taux d'émissions (de CO_2 , NO_x et PM) par bus.km respectivement dans le modèle de transport (FR) et dans l'inventaire suisse (ecoinvent, CH). Les facteurs de caractérisation sont disponibles dans l'Annexe M.

Calcul de la part liée à la production des carburants, à la fabrication des transports en commun et aux infrastructures

Pour les transports ferrés électriques, le vecteur d'impacts de la base de données environnementale est repris tel quel. Seule la consommation d'électricité en phase d'usage est contextualisée. Les infrastructures sont déjà prises en compte dans l'inventaire utilisé et ne sont pas réajustées.

Au niveau des transports thermiques (bus), la quantité de diesel consommée par km doit être ajustée : le bus moyen pris en compte dans le modèle MODUS consomme 2,2 fois plus de carburant que le bus moyen suisse. Le vecteur d'impacts final par bus.km est donné par l'équation suivante :

$$I_{\text{bus.km,model}} = I_{\text{bus.km,model,c1}} + I_{\text{diesel,kg}} \times (Q_{\text{diesel,FR}} - Q_{\text{diesel,CH}}) \quad 5-4$$

où $I_{\text{bus.km,model,c1}}$ correspond à l'inventaire corrigé des émissions directes, $I_{\text{diesel,kg}}$ correspond au vecteur d'impacts pour la production d'un kg de diesel, $Q_{\text{diesel,FR}}$ et $Q_{\text{diesel,CH}}$ correspondent à la consommation de carburant respectivement dans le modèle de transport (FR) et dans la base de données ecoinvent (CH).

Les impacts par bus.km corrigé et les impacts initiaux sont représentés en valeurs normalisées à la Figure 123. Les différences sont importantes pour de nombreux indicateurs, notamment l'épuisement des ressources abiotiques (+86 %), l'acidification (+95 %), l'eutrophisation (+122 %), la santé humaine (+92 %) dont l'effet est principalement dû à l'effet de serre (+88 %).

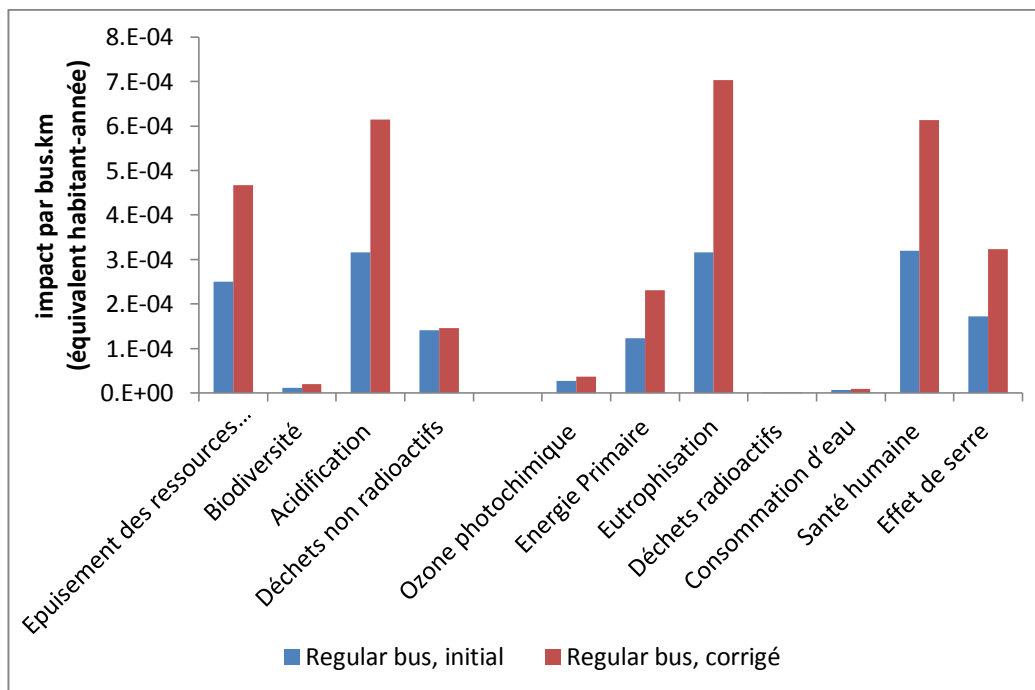


Figure 123 : Impacts environnementaux par bus.km initialement contenus dans la base de données et corrigés grâce au modèle de transport

Le modèle de transport tient compte du remplissage moyen par zone pour les bus. En utilisant ce taux de remplissage, il est possible de revenir à un impact par passager.km (voir Figure 124) adapté à la situation francilienne et différencié pour chaque zone du projet étudié. Le nombre de passagers par bus (R_{bus}) est déduit à partir du taux d'émission (par km) calculé par le modèle pour chaque zone :

$$R_{bus} = \frac{Q_{tot}}{D_{bus}} \times \frac{1}{Q_{km}} \quad 5-5$$

Q_{tot} représente l'émission totale de NO_x (ou de PM) calculée par le modèle de transport pour les bus, D_{bus} représente la somme des distances parcourues en bus par les usagers du quartier (en km) et Q_{km} représente la quantité d'émission par km parcouru pour 1 bus.

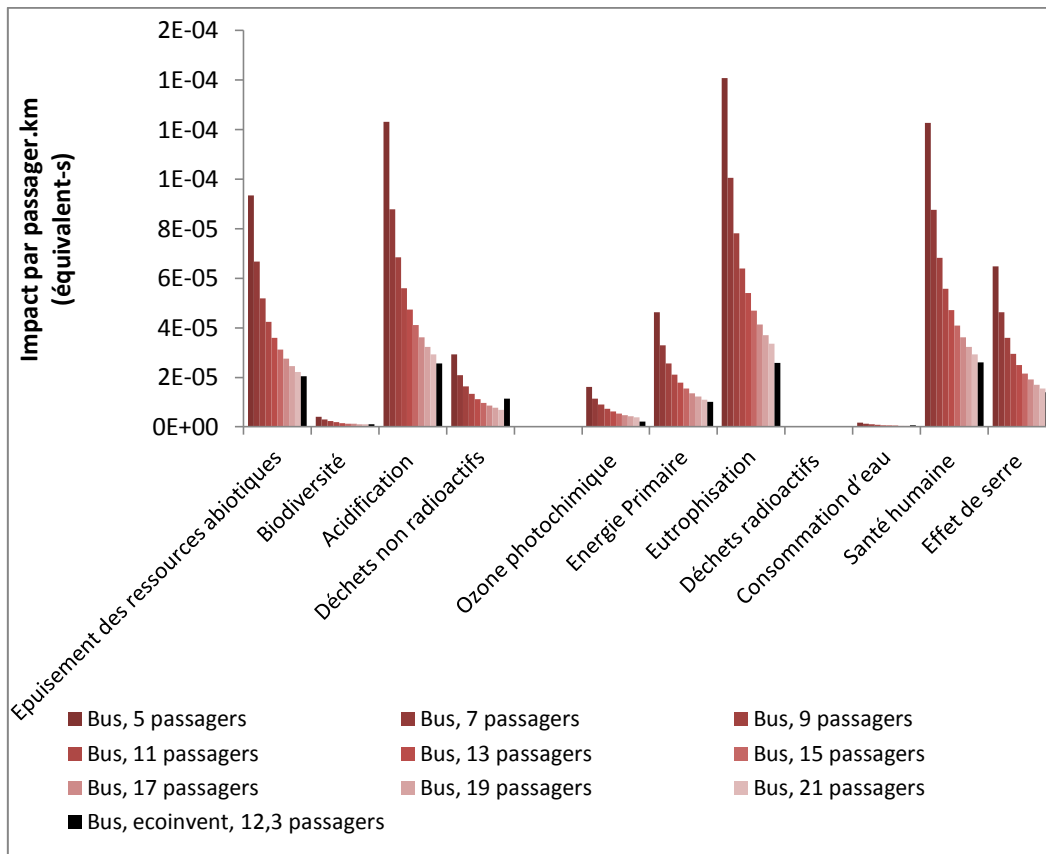


Figure 124 : Impacts environnementaux des bus par passager.km en fonction du taux de remplissage du bus

Ce taux de remplissage différencié donne accès à des stratégies d'amélioration zone par zone. Les émissions liées aux bus peuvent être comparées aux émissions des véhicules particuliers pour actionner des leviers d'action adaptés au contexte et aux comportements des usagers du quartier. Une zone pour laquelle le taux de remplissage est très faible pourra être ciblée pour l'installation de plateformes multimodales ou de véhicules électriques en libre service par exemple. Pour une zone où le taux de remplissage est très fort, la question de l'amélioration des performances du bus peut être plus pertinente.

5.2.3.6. ALLOCATION DES FLUX DE TRANSPORT AU QUARTIER EN ACV

Allouer l'ensemble des impacts des flux de transport émis et reçus au quartier conduit à un double comptage dans le cas d'une approche attributionnelle. Cette approche doit respecter un critère d'additivité donc un flux associé à un quartier ne peut être associé à un autre quartier. Or si le flux de transport pour chaque quartier est compté à l'origine et à la destination, il sera compté deux fois si l'on somme l'ensemble des quartiers (non respect du critère d'additivité). Afin d'éviter ce double-comptage, une équi-répartition entre origine et

destination est appliquée, et la moitié des flux totaux calculés est finalement associée au projet.

5.2.3.7. NOMBRE D'USAGERS DU QUARTIER ET NOMBRE D'ATTRIBUTS DU MODÈLE TRANSPORT

Selon les outils utilisés, le nombre de personnes concernées ou prises en compte dans le projet de quartier peut varier. Lorsqu'une simulation thermique dynamique d'un bâtiment de commerce est effectuée, les visiteurs des commerces sont pris en compte dans les apports internes et vont ensuite influencer les besoins associés au bâtiment et donc les impacts environnementaux associés à la consommation d'énergie du bâtiment. Certains paramètres peuvent par contre être comptabilisés pour les seuls employés de ces commerces, comme la consommation d'eau par jour.

En ce qui concerne le modèle de transport, les flux associés au quartier incluent l'ensemble des visiteurs du quartier (clients, rendez-vous professionnels, amis ou famille).

L'ensemble des attributs du quartier correspond par contre à la somme de la population non active (PNACT), de la population active (PACT), du nombre d'emplois total (ETOT) et du nombre de places étudiants (PETU).

Si les résultats sont exprimés par usager pour les besoins énergétiques des bâtiments, pour l'analyse de cycle de vie du quartier et pour les transports, il est important de s'assurer que la comptabilisation est homogène entre les différents calculs si on veut pouvoir faire une synthèse générale.

5.2.4. *Discussion et conclusion*

Cette partie propose trois approches de modélisation dépendant de l'objectif de l'étude afin d'intégrer la mobilité quotidienne dans l'ACV des bâtiments, des quartiers ou des territoires. Selon l'objectif de l'étude et les données disponibles, les impacts environnementaux associés au projet de quartier seront différents et il n'est pas toujours possible d'obtenir l'ensemble des modélisations nécessaires à la réalisation d'une étude conséquentielle-projet.

L'utilisation des sorties d'un outil de modélisation transport est proposée dans un second temps afin d'améliorer la précision et le réalisme de l'étude ACV. Elle permet de prendre en compte des effets comme la congestion des zones urbaines. La contextualisation des données de transport a une influence importante sur les résultats, notamment concernant la flotte de bus utilisée en

région francilienne par rapport aux données génériques contenues dans la base suisse ecoinvent.

Des études ont montré l'importance de « l'effet barbecue » pour les habitats individuels par rapport aux logements collectifs : les habitants de maisons individuelles peuvent avoir un besoin de mobilité plus restreint lié à l'espace dont ils bénéficient sur leur propre terrain, alors que les habitants d'appartement auraient une plus forte tendance à « se mettre au vert » et donc à se déplacer pour les week-ends ou les vacances. Cet effet a été observé en région parisienne (Nguyen, 2014). Ce type d'effet rebond est lié à des effets sociologiques et peut être modulé en fonction des aménagements du quartier (p. ex. jardin partagé). L'effet barbecue n'a pas été analysé dans le cadre de cette thèse, qui se focalise sur les options de conception des quartiers et la mobilité quotidienne associée. Il pourrait cependant être l'objet d'une analyse de sensibilité dans le cadre de l'analyse d'un projet de développement urbain, en collaboration avec des sociologues.

Les modèles de transport considèrent généralement un état initial, qui permet notamment de calibrer le modèle ou d'effectuer un diagnostic mobilité de la zone urbaine étudiée. Dans le cas de l'évaluation d'un projet de développement urbain incluant une partie d'infrastructure de transport, la zone impactée est projetée dans un état futur dans lequel le projet de développement urbain a été réalisé. Il est peu fréquent de disposer de cet état futur sans le développement urbain prévu. Or, dans le cas d'une étude conséquentielle, c'est bien la variation entre la situation avec et sans projet que l'on cherche à analyser, en particulier si le projet concerne à la fois le parc bâti et le réseau de transport urbain. La variation entre l'état initial et l'état futur concerne souvent un périmètre plus large que le projet (changement des caractéristiques des parcs de véhicules, évolution démographique). Toutefois, l'analyse environnementale n'étant pas en mesure de légitimer le projet prévu, le plus important est de disposer de différentes variantes de conception, ce qui n'est pas toujours le cas. Un changement d'échelle, du quartier à une ville ou partie de ville, est un axe de recherche à part entière. La complexité de ce changement d'échelle va bien au-delà du changement « bâtiment vers quartier » et des outils d'analyse supplémentaires peuvent être nécessaires, comme les modélisations hybrides *ACV-InputOutput*.

Une application de la méthodologie proposée selon la démarche attributionnelle ou la démarche conséquentielle-projet (échelle quartier) est effectuée dans le chapitre 6 portant sur l'étude de la Cité Descartes. La procédure complète est résumée à la Figure 125.

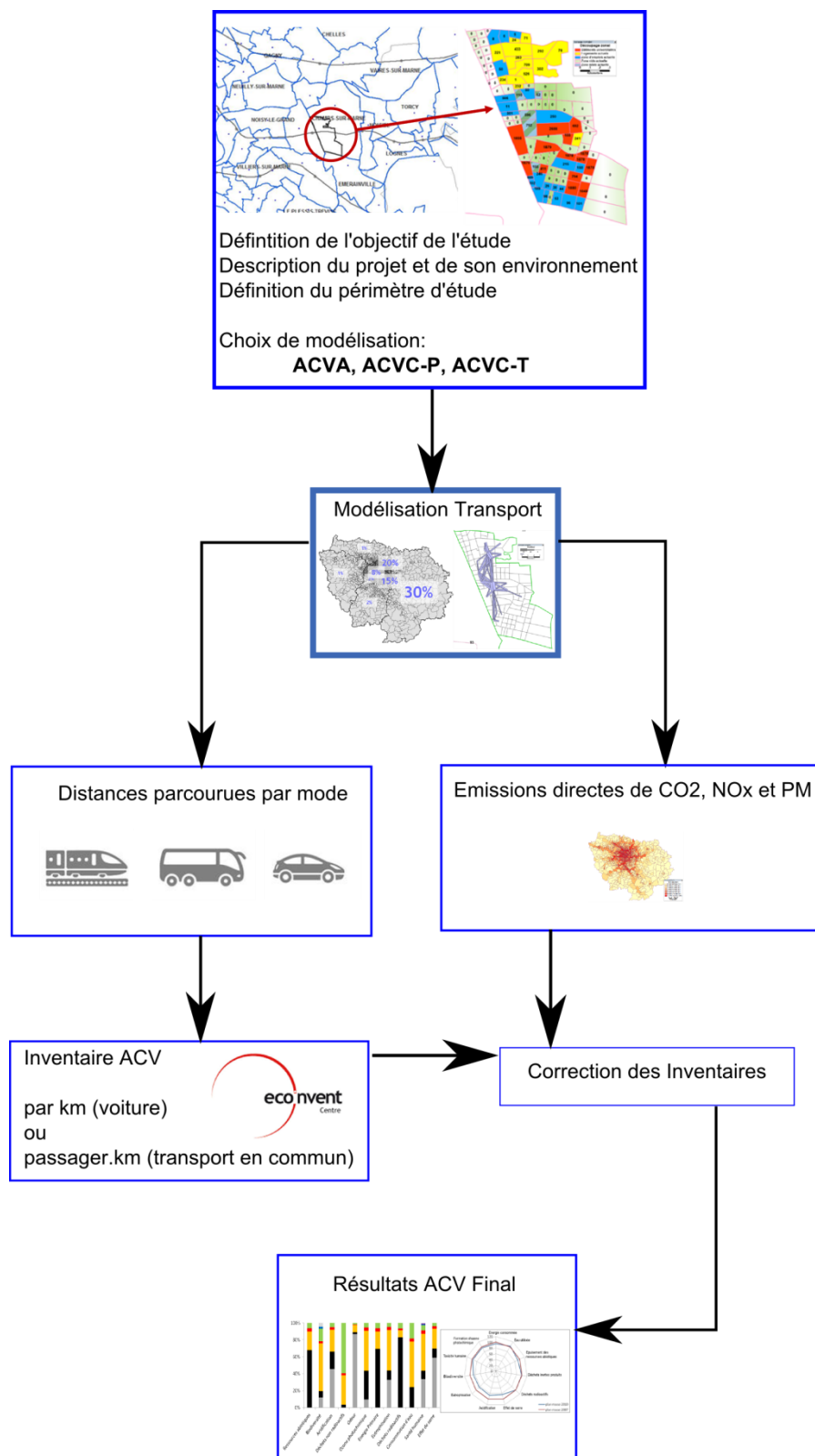


Figure 125 : Résumé de la procédure de détermination des impacts transport

5.3. LE TRAITEMENT DES DÉCHETS MÉNAGERS

L'installation d'un nouveau quartier génère une arrivée d'occupants (habitants, activités économiques) produisant des déchets. Ceux-ci vont devoir être « traités » par la collectivité en fonction des possibilités : existe-t-il des usines de recyclage à proximité, un incinérateur, où vont-ils être mis en décharge ? Tous les déchets vont-ils être « traités » de la même façon ? Quel effort de collecte doit/va être fourni par la collectivité ?

À l'échelle d'un projet de bâtiment, la gestion des déchets ménagers est souvent exclue des frontières du système car elle n'est pas influencée par la conception de l'enveloppe ou les systèmes énergétiques⁹². À l'échelle du quartier, des leviers d'action pouvant influencer le bilan environnemental du projet existent :

- valorisation organique : installations de compostages collectifs, mise en place de jardins partagés ;
- consigne pour le verre ;
- collecte séparée des plastiques ;
- quartier relié à un réseau de chaleur comprenant un incinérateur de déchets ménagers (UIOM) ;
- etc.

La diversité des options et des matières concernées par le cas des déchets ménagers impose une vision systémique du quartier et une analyse des contraintes pesant notamment sur les incinérateurs de déchets (Figure 126).

⁹² La gestion des déchets ménagers peut par contre être intégrée dans le cas d'une étude sur les comportements en vue d'une politique de sensibilisation. Cela dépend des objectifs de l'étude.

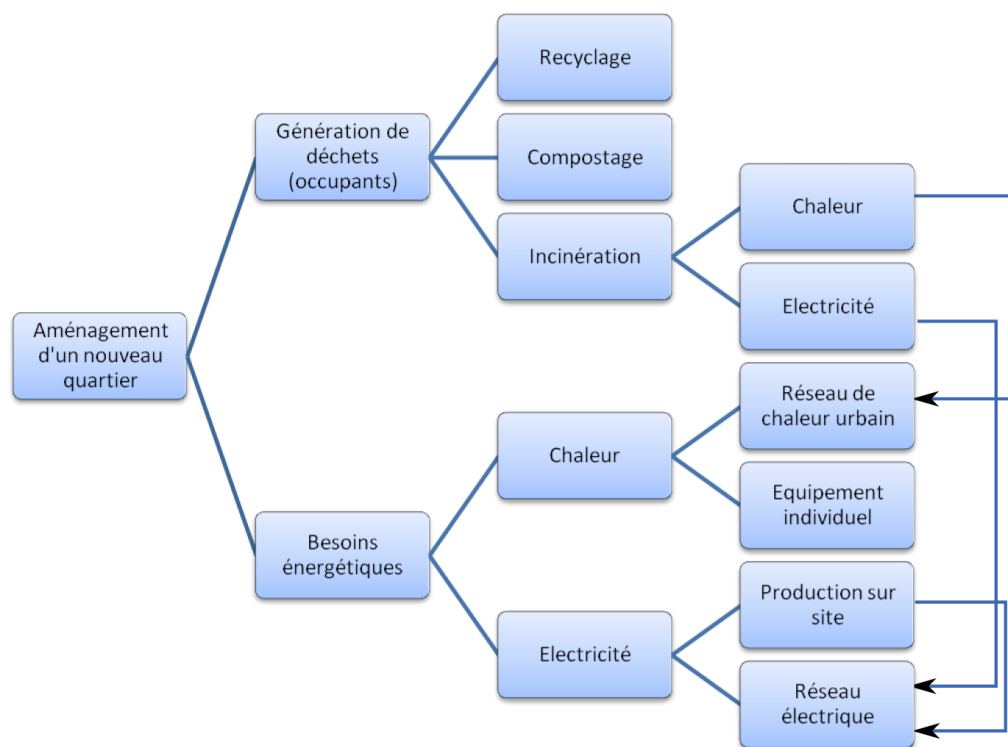


Figure 126 : Vision systémique du quartier - déchets vs besoins énergétiques

5.3.1. Bilan global des impacts

À partir d'une quantité donnée « q_i » d'un type de déchet « i » en sortie du bâtiment (verre, papier/carton, déchets organiques, autres), les impacts $I_{q,i}$ associés au traitement de cette quantité de déchets peuvent être exprimés comme une différence entre les impacts générés par le traitement $I_{t,i}$ et les impacts éventuellement évités $I_{e,i}$ par le recyclage ou la valorisation des déchets (équation 5-6). Les impacts évités ($I_{e,i}$) dépendent du taux de recyclage ou de valorisation matière (r_i), du taux de valorisation énergétique (v_i), du type de valorisation (production de chaleur, d'électricité) et du PCI du déchet :

$$I_{q,i} = I_{t,i} - I_{e,i} \quad 5-6$$

$$I_{t,i} = q_i \times (I_{pv,i} + r_i \times I_{r,i} + v_i \times I_{v,i} + (1 - r_i - v_i) \times I_{d,i}) \quad 5-7$$

$$I_{e,i} = q_i \times (r_i \times I_{pv,i} + v_i \times PCI_i \times \rho_{el} \times I_{elec} + v_i \times PCI_i \times \rho_{ch} \times I_{ch}) \quad 5-8$$

Avec $I_{pv,i}$ l'inventaire de production vierge de la matière jetée i , $I_{d,i}$ l'inventaire de mise en décharge du déchet i , r_i la part de déchets recyclés, I_r l'inventaire d'impact du recyclage, v_i la part de déchets valorisés, $I_{v,i}$ l'inventaire d'impact

de la valorisation (incinération) du déchet i , ρ_{el} le rendement électrique de la valorisation, ρ_{ch} le rendement thermique de la valorisation, I_{elec} l'inventaire d'impact de la production d'électricité évitée par l'incinération des déchets, I_{ch} l'inventaire d'impact de la chaleur évitée par l'incinération des déchets.

Le terme I_{pv} intégré dans l'impact du traitement des déchets permet de s'assurer qu'une augmentation de la quantité de déchets ne va pas engendrer une baisse de l'impact total de traitement. La prise en compte d'impacts évités, donc négatifs, ne peut être faite qu'en incluant la charge environnementale initiale du matériau. Cela assure également qu'une politique de réduction des déchets réduit l'impact lié à leur traitement. Ce terme peut être ôté seulement dans le cadre d'une étude comparative à quantité de déchets fixée (par type de déchets) ou dans le cadre d'une étude attributionnelle type *cut-off* (Schrijvers et al., 2016) qui ne considérerait aucun bénéfice environnemental associé à la valorisation ou au recyclage du déchet en fin de vie.

5.3.2. Frontières du système, approche « conséquentielle-projet »

L'approche conséquentielle vise à évaluer l'ensemble des conséquences environnementales liées à une décision. Le système de traitement des déchets ménagers peut avoir une influence sur les décisions de conception. Par exemple : doit-on relier le nouveau quartier au réseau de chaleur urbain valorisant l'incinération des déchets ? Quel est l'effet de la mise en place d'un compost collectif en pied d'immeuble sur le traitement des déchets ?

L'influence de la conception du quartier sur la quantité de déchets générés par ses occupants est considérée comme négligeable. Le comportement en matière de consommation des occupants du quartier est une donnée d'entrée du problème de conception. La variabilité des comportements peut être traitée par des analyses de sensibilité et d'incertitude mais l'ensemble des variantes de conception peut être analysé en considérant un même comportement (ou une distribution de comportement) et donc une quantité de déchets fixée pour chaque type, en sortie des bâtiments. Même s'il est envisageable de traiter directement une partie des déchets au sein du quartier (p.ex. déchets organiques valorisés en compost), cela n'influence pas la quantité de déchets au départ (p. ex. quantité de déchets organiques avant envoi vers le compost).

La charge environnementale initiale des matériaux est donc exclue des frontières du système étudié. Elle ne constitue pas une conséquence environnementale de la réalisation du projet, mais une information préalable. L'équation 5-7 devient :

$$I_{t,i} = q_i \times (r_i \times I_{r,i} + v_i \times I_{v,i} + (1 - r_i - v_i) \times I_{d,i})$$

Finalement, les différents éléments à considérer pour le traitement d'un type de déchet en sortie d'un bâtiment pour une ACV quartier « conséquentielle-projet » sont :

- les caractéristiques du flux de déchet : quantité, composition, pouvoir calorifique ;
- les chemins possibles de traitement : recyclage, valorisation énergétique, valorisation matière, mise en décharge ;
- la disponibilité et la compétitivité économique des différents chemins de traitement : existe-t-il des chemins contraints (p. ex. capacité maximale atteinte, débouchés insuffisants) ? Quels sont la ou les modes de traitement marginaux ?

5.3.3. **Recyclage, valorisation matière et mise en décharge**

La prise en compte du recyclage des déchets ménagers dans une ACV-quartier selon une approche conséquentielle-projet va suivre les mêmes principes que le recyclage des matériaux. En fonction du marché affecté, seule la mise à disposition de matière recyclée ou l'utilisation de matière recyclée va entraîner un recyclage effectif.

Dans le cas des déchets ménagers, seule la mise à disposition de matière recyclée est évaluée (équation 5-9). Celle-ci va dépendre des efforts de collecte (conteneurs séparés pour différents types de déchets, systèmes de récupération des déchets dangereux). Les impacts associés au recyclage doivent également prendre en compte les distances de transport jusqu'au centre de tri puis au centre de recyclage.

Le cas de la valorisation matière peut être traité de façon similaire au recyclage et adapté de la même manière à l'approche de modélisation (attributionnelle ou conséquentielle). Les différentes configurations possibles ont été analysées de façon complète dans les travaux de Schrijvers et al. (2016) et ne seront pas détaillés de manière plus poussée dans cette thèse. Une modélisation « *cut-off* » est considérée dans le cas d'une approche attributionnelle et une modélisation « *waste mining* » ou « *end of life* » est utilisée selon le marché affecté. A défaut d'informations précises sur le marché affecté et les facteurs limitants de production, une modélisation « *50-50* » peut être appliquée. Les différentes représentations schématiques de ces modélisations, extraites des travaux de Schrijvers, sont données en Annexe N.

Le cas de la mise en décharge ne pose aucune difficulté de modélisation particulière par rapport à la nature attributionnelle ou conséquentielle de l'étude. En effet, le procédé associé à la mise en décharge dépend du type de déchets (inertes, non dangereux, dangereux) et non de la compétitivité des différentes technologies. De plus, c'est le mode de traitement ultime qui doit être envisagé en dernier lieu, si le déchet ne peut être ni recyclé, ni valorisé.

Le cas de l'incinération des déchets est lié de façon plus complexe au fonctionnement des quartiers car l'énergie produite peut être utilisée dans les bâtiments. La suite de cette partie se concentre sur la prise en compte de l'incinération dans l'ACV des quartiers.

5.3.4. Disponibilité et compétitivité des incinérateurs liés aux réseaux de chaleur urbain

Dans le cas d'un incinérateur de déchets alimentant un réseau de chaleur urbain, plusieurs cas de figure peuvent se présenter : saturation de l'incinérateur, incinérateur disponible mais dont la chaleur est sous-exploitée, incinérateur disponible et dont la chaleur est entièrement valorisée.

5.3.4.1. CAS N°1 : INCINÉRATEUR SATURÉ

Si la capacité maximale de traitement de déchets de l'incinérateur est atteinte, le surplus de déchets générés par le nouveau quartier ne pourra pas être incinéré ici. Les déchets qui doivent être incinérés le seront dans l'incinérateur encore disponible le plus proche (augmentation des impacts liés au transport vers l'incinérateur) ou seront mis en décharge⁹³.

La mise en place d'un site de compostage pour les déchets organiques dans le quartier gagnera en intérêt dans ce contexte. L'ajout de bâtiments sur le réseau de chaleur urbain fera intégralement appel aux capacités modulables du réseau, donc les technologies pouvant satisfaire une augmentation de la demande en chaleur (technologies marginales). L'UIOM ne participera pas à la demande supplémentaire car il est saturé et ne peut produire plus. Les impacts liés à l'augmentation de la demande de chaleur dépendront de la technologie la moins chère disponible sur le réseau de chaleur urbain (gaz ou bois par exemple). L'intérêt environnemental du raccordement du quartier au réseau de chaleur ou d'un éventuel ajout de capacité de production sur le réseau de

⁹³ D'après la directive européenne cadre déchet transposée en droit français dans l'ordonnance n°2010-1579, les déchets valorisés énergétiquement sont inclus parmi ceux qui n'ont pas de débouché pour la réutilisation ou le recyclage.

chaleur devra être évalué en tenant compte des technologies marginales de production.

5.3.4.2. CAS N°2 : INCINÉRATEUR DISPONIBLE DONT LA CHALEUR EST SOUS-EXPLOITÉE

Les incinérateurs sont des systèmes peu modulables. Leur fonctionnement dépend davantage de la quantité de déchets à traiter que de la demande en chaleur. Si la quantité de chaleur produite est trop importante par rapport à la demande, elle est perdue. Ce cas de figure peut être observé surtout en été sur les réseaux de chaleur urbains, lorsque seule la demande en eau chaude sanitaire est présente, constituant un différentiel important avec l'hiver⁹⁴.

En fonction du niveau de sous-exploitation de la chaleur de l'incinérateur et de la demande en chaleur du nouveau quartier, plusieurs options peuvent être envisagées. Le raccordement du quartier au réseau de chaleur permettra de mieux valoriser la chaleur de l'incinérateur, diminuant la chaleur perdue en été. Cependant, la demande supplémentaire due au chauffage des bâtiments sera satisfaite par la technologie marginale de production de chaleur hivernale. Une autre option à considérer si l'incinérateur est très sous-exploité et si le nouveau quartier est très performant peut être d'installer une cogénération ou une tri-génération sur l'incinérateur si celui-ci ne produit que de la chaleur.

5.3.4.3. CAS N°3 : INCINÉRATEUR DISPONIBLE DONT LA CHALEUR EST ENTIÈREMENT VALORISÉE

Le surplus de déchets généré par le nouveau quartier pourra être traité par l'incinérateur et la chaleur sera valorisée. Cependant, une partie importante de la demande en chaleur du quartier sera alors satisfaite par la technologie marginale de production de chaleur (le différentiel entre la chaleur générée par les déchets et la demande en chaleur du quartier). En fonction de cette technologie, le raccordement du quartier au réseau de chaleur peut être plus ou moins intéressant.

On constate ainsi que les conséquences environnementales de l'ajout d'un quartier relativement au réseau de chaleur urbain et au traitement des déchets peuvent s'éloigner de manière importante d'une simple analyse du mix de chaleur moyen dispensé par le réseau de chaleur urbain. Les paragraphes suivants reviennent sur l'importance d'une caractérisation différenciée des déchets pour l'évaluation des impacts environnementaux générés et éventuellement évités par l'incinération des déchets ménagers.

⁹⁴ Enquête AMORCE « Performances et recettes des Unités de valorisation énergétique des ordures ménagères », Octobre 2011, p.8

5.3.5. L'importance de la différenciation des déchets incinérés

Les impacts (odeur exclue⁹⁵) de l'incinération de cinq types de déchets parmi les plus courants (mélanges de plastiques, déchets organiques, peintures, papiers/cartons, bois non traités) ainsi que l'incinération d'un mélange moyen de déchets ménagers sont présentés à la Figure 127. Les émissions de carbone biogénique ont été prises en compte pour la contribution au changement climatique et les dommages à la santé humaine. Les valeurs des impacts sont exprimées en part relative de la plus forte contribution (le procédé le plus impactant est fixé à 1).

⁹⁵ Cet indicateur a été exclu car il n'y a pas de valeur de normalisation qui lui corresponde. Cependant, il a été calculé pour les différents cas et les résultats sont disponibles dans les tables en annexe.

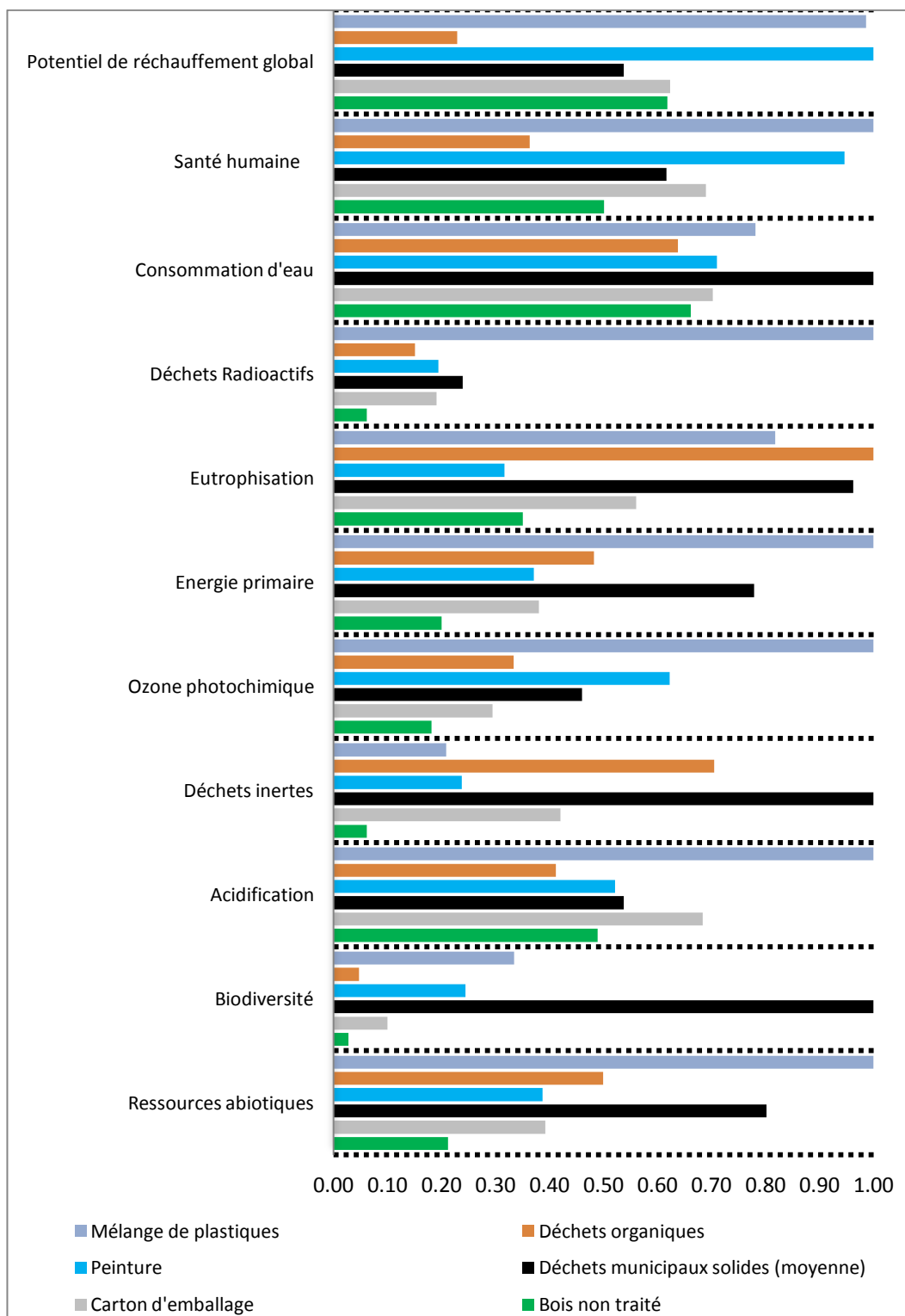


Figure 127 : Variabilité des impacts environnementaux selon le type de déchet incinéré

Le type de déchet considéré fait varier de façon importante la valeur de tous les indicateurs environnementaux. La valeur des indicateurs de dommages à la biodiversité et de déchets inertes est plus élevée dans le cas des déchets

municipaux à cause de la présence de métaux qu'on ne retrouve qu'à l'état de traces dans les plastiques (cuivre, aluminium notamment). La variation sur les déchets radioactifs semble importante, cependant elle concerne des valeurs très faibles, comme le montre la Figure 128, qui présente les impacts normalisés. Autrement, les plastiques (Mélange, PE, polyuréthane) dominent 6 catégories d'impacts sur 11. La consommation d'eau plus élevée pour la moyenne du traitement des déchets municipaux solides est liée au traitement de types de plastiques spécifiques comme le PVC, au traitement des métaux et verres, dont l'indicateur de consommation d'eau dépasse 2 litres par kg de déchets traités contre 1,1 (déchets organiques) à 1,3 litres (mélange de plastiques) pour les types de déchets représentés à la Figure 127 (voir également le Tableau 66 de l'Annexe O).

Les impacts de 55 procédés d'incinération de déchets solides ont été calculés à partir de la base de données ecoinvent v 3.1 et normalisés afin de sélectionner les indicateurs qui sont les plus susceptibles d'avoir une influence importante sur le bilan final du système étudié. Le Tableau 61 présente les valeurs utilisées pour la normalisation. La Figure 128 présente la valeur normalisée des impacts environnementaux pour les 55 procédés, sous forme de boîte à moustaches. La liste des 55 procédés analysés est disponible dans le Tableau 64 de l'Annexe O. Les bords de la boîte représentent les 1er et 3ème quartiles, le trait rouge donne la médiane des valeurs considérées. Les extrémités des moustaches sont placées à 1,5 fois la valeur médiane.

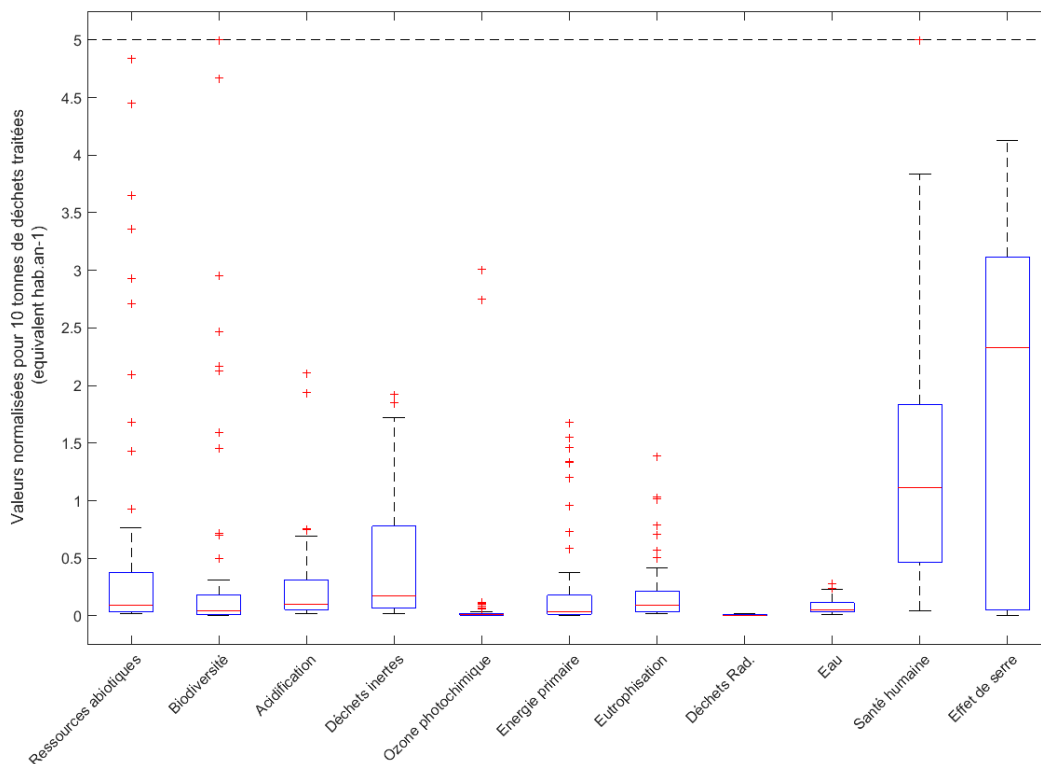


Figure 128 : Impacts minimaux, maximaux et moyens normalisés, pour 10 tonnes de déchets incinérés, étude sur 55 procédés de traitement de déchets solides⁹⁶

On constate que les indicateurs de toxicité humaine et de potentiel de réchauffement global prédominent, suivi de l'indicateur de déchets inertes, dont l'importance est liée à la présence d'incombustible (métaux, verre). Des valeurs très élevées ont été observées pour quelques procédés particuliers concernant les impacts sur la biodiversité. Ce sont des procédés d'incinération de déchets contenant des métaux : cuivre en particulier mais aussi zinc, plomb ou acier présents dans les équipements électroniques ou les pièces mécaniques par exemple. Étant donné les parts relatives sur les indicateurs normalisés, les indicateurs de toxicité humaine et de potentiel de réchauffement global sont considérés dans la suite pour une analyse plus poussée⁹⁷. La Figure 129 présente l'évaluation des dommages à la santé humaine et du potentiel de réchauffement global pour les 14 procédés représentatifs de l'incinération des déchets ménagers : différentes sortes de plastiques, bois, papiers carton, textiles,

⁹⁶ La valeur maximale de l'axe des ordonnées est fixée à 5 équivalents-habitant-année. Concernant les impacts sur la biodiversité, seuls deux procédés sur 55 dépassent cette valeur, l'incinération du cuivre (107 équivalents habitants-années) et l'incinération du zinc issu du broyage de véhicules (6 équivalents habitants-années). Pour la santé humaine, un procédé n'apparaît pas sur la figure à cause de sa valeur particulière trop élevée : l'incinération de particules de charbon qui génère des émissions de mercure, très toxiques.
⁹⁷ Le Tableau 66 disponibles en Annexe O donnent les résultats sur l'ensemble des indicateurs environnementaux.

déchets organiques⁹⁸. Pour le procédé d'incinération moyen des déchets municipaux solides, le carbone biogénique représente 59 % du potentiel de réchauffement global et 33 % des dommages à la santé humaine (voir Figure 129).

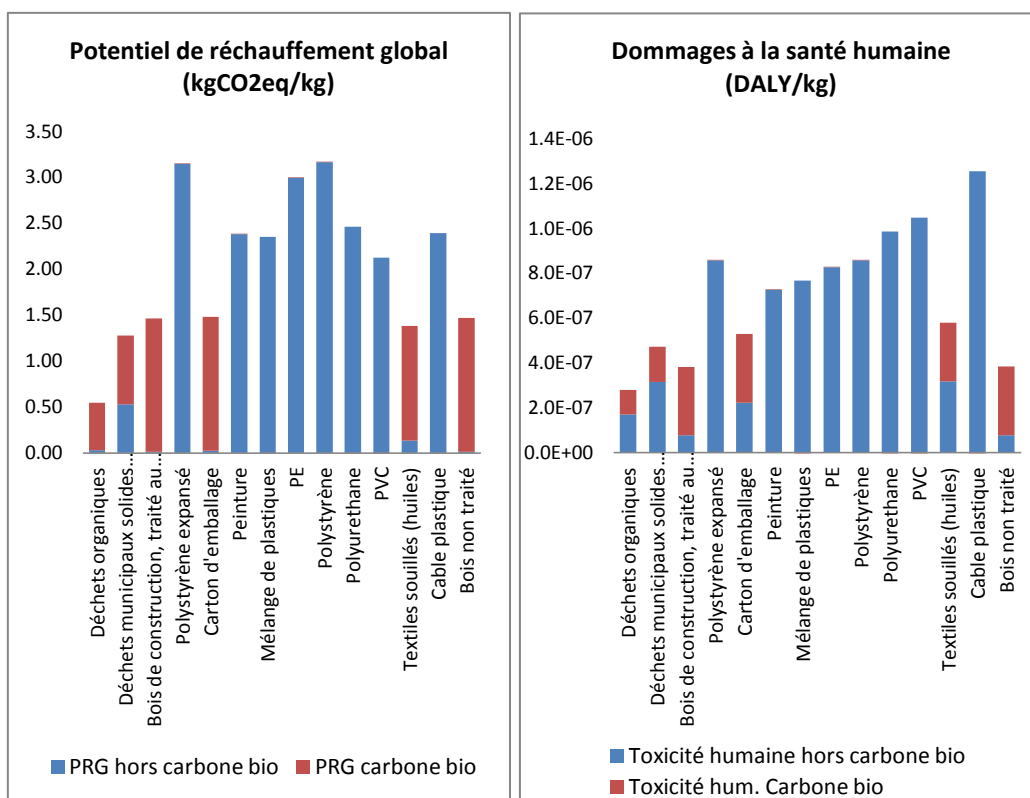


Figure 129 : Impacts potentiel de réchauffement global et dommages à la santé humaine par kg de déchets incinérés, pour 11 procédés représentatifs

Par rapport à la valeur de référence des déchets municipaux solides, l'impact potentiel de réchauffement global de l'incinération peut être jusqu'à deux fois plus faible (e. g. déchets organiques) ou deux fois plus élevé (e. g. polystyrène) suivant le type de déchet incinéré. On retrouve les mêmes ordres de grandeur pour les dommages à la santé humaine avec un impact des déchets organiques deux fois plus faible que l'impact des déchets municipaux solides et un impact du PVC deux fois plus important.

Le bois traité et le bois non traité présente un résultat très similaire sur les deux indicateurs. La méthode de caractérisation utilisée, Eco-indicator99 (Goedkoop

⁹⁸ Selon le synoptique des flux de déchets collectés par le service public, les ordures ménagères résiduelles (OMR) représentent plus de 94 % des déchets incinérés (<http://www.ademe.fr/expertises/dechets/chiffres-cles-observations/dossier/flux-couts/collecte-dechets-service-public-france>, p.27). Selon la campagne de caractérisation des déchets, l'ensemble des déchets putrescibles, des papiers cartons, des plastiques et des textiles représente plus de 70 % des OMR (ADEME, 2015a, p. 23).

et Spriensma, 2001) considère l'effet écotoxique du chrome sur la biodiversité, mais pas sur la sante humaine. Un changement de méthode de caractérisation, comme l'utilisation de la méthode USEtox (Rosenbaum et al., 2008) donnerait des résultats différents, comme illustré sur la Figure 130.

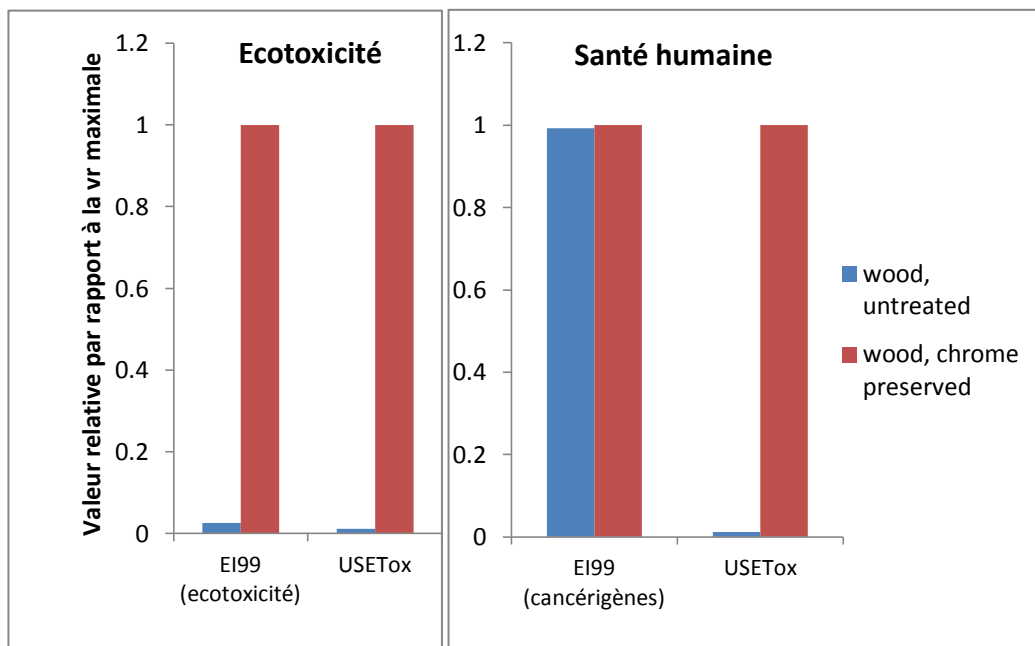


Figure 130 : Comparaison de la prise en compte des substances toxiques et écotoxiques pour l'incinération du bois traité et non traité dans les méthodes de caractérisation EI99 et USEtox

5.3.6. Incinération et valorisation énergétique

Dans le cas où l'incinérateur est équipé d'un système de récupération d'énergie (chaleur ou électricité), l'incinération permettra d'éviter l'utilisation d'une autre ressource. Les impacts évités par l'incinération d'un kg de déchet sont donnés par l'équation 5-10.

$$I_{\text{évité}} = PCI_{\text{déchet}} \times R \times I_{\text{énergie}}$$

5-10

où $PCI_{\text{déchet}}$ représente le pouvoir calorifique inférieur (en MJ/kg) du déchet incinéré, R représente le rendement sur PCI de l'incinérateur. $I_{\text{énergie}}$ représente les impacts générés par la fourniture d'un MJ utile par la ressource évitée. L'hypothèse faite sur la nature de la ou des ressources évitées est importante. Une modélisation suivant l'approche « conséquentielle-projet » nécessite de déterminer la technologie marginale de production de la chaleur ou de l'électricité pour calculer les impacts évités.

Le rendement de l'incinération sera différent selon le fonctionnement de l'incinérateur. Certains produisent seulement de la chaleur (valorisée par un réseau de chauffage urbain), certains produisent uniquement de l'électricité (lorsqu'ils sont trop loin des bassins de consommation, la chaleur ne pouvant être distribuée sur une longue distance car les pertes seraient trop importantes), certains produisent à la fois de la chaleur et de l'électricité (cogénération). Ces trois formes de valorisation sont bien représentées en France (Tableau 65 de l'Annexe O). Le rendement global pour le calcul de l'énergie effectivement distribuée en sortie d'usine doit intégrer les sources de pertes suivantes :

- pertes dues aux installations : rendement chaudière, turbo-alternateur, auxiliaires, etc.;
- pertes dues à l'autoconsommation de l'installation (évaluée à 15 % de l'énergie produite dans les installations suisses⁹⁹) ;
- pertes de valorisation : lorsqu'il n'y a pas d'acheteur pour l'énergie produite.

L'association AMORCE donne une valeur moyenne pour le PCI des déchets incinérés de 2000 kWh/t, soit 7,2 MJ/kg. En reprenant les informations diffusées par l'ADEME¹⁰⁰ et l'enquête ITOM 2010¹⁰¹ sur la quantité de déchets incinérés et la quantité d'énergie produite/vendue par les UIOM françaises, les rendements électriques et thermiques de l'ensemble de la chaîne ont été calculés. Les résultats sont donnés dans le Tableau 43.

Tableau 43 : Rendement électrique et thermique sur PCI des unités d'incinération d'après chiffres ADEME et ITOM)

Mode de valorisation	Quantité de déchets (Mt/an)	Énergie produite (GWh/an)	Rendement sur énergie produite (% - PCI : 2000 kWh/t)	Énergie vendue par tonne incinérée (kWh/t)	Rendement sur énergie vendue (%)	Rendement de valorisation (vendue/produite)
Électrique seul	4,5	1683	18,7	317,7	15,9	84,9
Thermique seul	1,7	1888	56,8	1078,4	53,9	94,9
Cogénération	7,6	Th : 5701	37,5	851,0	27,9	74,4
		EI : 1974	13,0		11,4	87,8

Ces différents rendements sont considérés dans la suite pour le calcul des impacts évités, soit :

- 15,9 % sur PCI pour la production d'électricité seule ;
- 53,9 % pour la production de chaleur seule ;
- 27,9 % pour la production thermique par cogénération ;
- 11,4 % pour la production électrique par cogénération.

⁹⁹ <http://www.bafu.admin.ch/abfall/01495/01496/index.html?lang=fr>

¹⁰⁰ http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/adm00013687_adm_attache1.pdf, p52-53

¹⁰¹ <http://www.ademe.fr/installations-traitement-ordures-menageres-itom-resultats-2010>

Cependant, dans le cas de l'étude d'un projet en particulier, il est nécessaire de collecter des informations plus précises sur les rendements de l'incinérateur si la contribution de l'incinération des déchets ménagers n'est pas négligeable.

Les valeurs calculées pour la cogénération sont proches des valeurs considérées dans ecoinvent : efficacité globale de 13 % pour la production d'électricité et 25,6 % pour la production de chaleur (Doka, 2007). Ces valeurs sont par ailleurs basses par rapport à certaines valeurs disponibles dans la littérature (Münster et Lund, 2009) et par rapport aux meilleurs rendements observés en Suisse (voir Figure 197 de l'Annexe O), ce qui suggère une marge de progression importante pour l'efficacité des installations d'incinération en France.

Les valeurs des pouvoirs calorifiques inférieurs et supérieurs pour chaque type de déchet sont données dans le Tableau 44. Ils ont été extraits des descriptions de la base ecoinvent v3.

Tableau 44 : Pouvoir calorifique inférieur et supérieur des déchets

Type de déchet traité	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/Kg)
Bois de construction, traité au chrome	15,36	13,99
Bois non traité	15,36	13,99
Câble plastique	26,81	25,95
Carton d'emballage	17,91	15,92
Déchets municipaux solides (moyenne)	13,05	11,7
Mélange de plastiques	34,05	30,79
Peinture	10,86	10,14
Polystyrène	38,88	38,67
Polystyrène expansé	33,2	32,2
Polyuréthane	30,9	30,67
PVC	23,26	22,53
Déchets organiques	6,087	4,289
Polyéthylène	42,82	42,47
Textiles souillés (huiles)	19,78	14,45

Les pouvoirs calorifiques sont très variables en fonction du type de déchet considéré : entre 4,3 kg/MJ pour les déchets organiques et 43 kg/MJ pour le polyéthylène, soit un facteur dix.

Pour pouvoir comparer les impacts évités par la production de chaleur ou d'électricité par un incinérateur, il est d'important d'intégrer les pertes de distribution, qui ne sont pas identiques pour les réseaux de chaleur et les réseaux d'électricité. Les pertes dans les réseaux de chaleur sont très variables en fonction de la qualité du réseau (isolation des conduits, réglage des sous-stations, température de consigne, fuites...) et de la longueur du réseau. Elles peuvent varier de 8 % à plus de 20 %, avec une valeur moyenne de 12 % considérée pour les petits réseaux de chaleur (Prévot et Orselli, 2006). Les pertes du réseau

électrique basse et moyenne tension sur lequel sont raccordés les incinérateurs sont de l'ordre de 6 %.

5.3.6.1. IMPACTS ÉVITÉS PAR PRODUCTION DE CHALEUR

Ce cas correspond à un incinérateur produisant uniquement de la chaleur, avec un rendement de 53,9 %. On considère que la ressource évitée peut être du gaz ou du fioul, brûlé dans une chaudière collective, à l'identique de ce qui est considéré dans NovaEquer. La chaudière fioul a toujours des impacts supérieurs à la chaudière gaz, sauf en ce qui concerne les déchets inertes. Les impacts normalisés de la production d'un MJ utile par une chaudière gaz et une chaudière fioul sont présentés à la Figure 131.

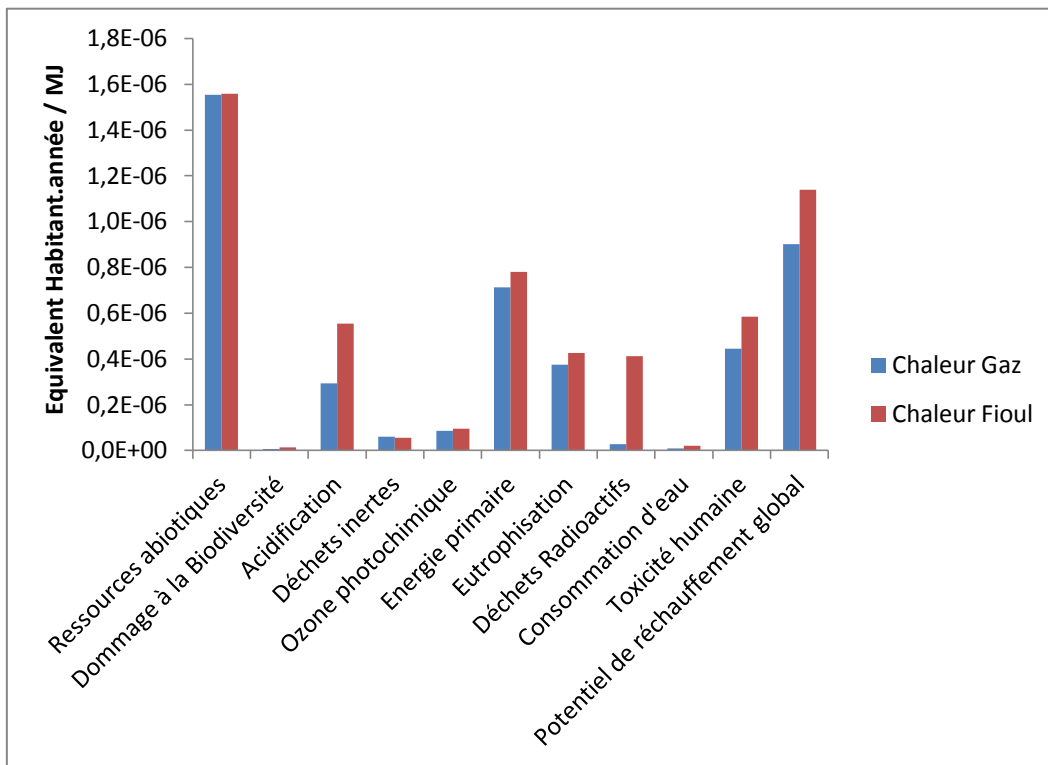


Figure 131 : Évaluation des impacts des chaudières gaz et fioul (en habitant-équivalent année/MJ utile)

Les valeurs de quatre indicateurs normalisés sont très faibles par rapport aux autres : les dommages à la biodiversité, la production de déchets inertes, la production d'ozone photochimique, la consommation d'eau. En revanche, on retrouve notamment la toxicité humaine et le potentiel de réchauffement global dans les impacts les plus significatifs. Le PCI des déchets variant de 1 à 10, on va avoir également une variation d'un facteur 10 pour les impacts évités, à combustible identique.

5.3.6.2. IMPACTS ÉVITÉS PAR PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

On considère deux hypothèses distinctes concernant le mix électrique évité par la valorisation des déchets : le mix annuel moyen de 2014 et un mix annuel marginal simplifié composé à 75 % de thermique et à 25 %¹⁰² de nucléaire. Les compositions de ces deux mix par technologie sont données dans le Tableau 45. Les impacts normalisés par MJ produit sont présentés à la Figure 132.

Tableau 45 : Composition des mix électriques moyen et marginal

	Fioul& Pointe	Charbon	CCG	Nucléaire	Éolien	Solaire	Hydro	Enr Thermique	Cogé Fossil
Mix moyen	0,1	2,1	2,0	75,2	3,2	1,1	12,3	1,1	3,0
Mix marginal	7,6	42,0	25,4	25,0	0	0	0	0	0

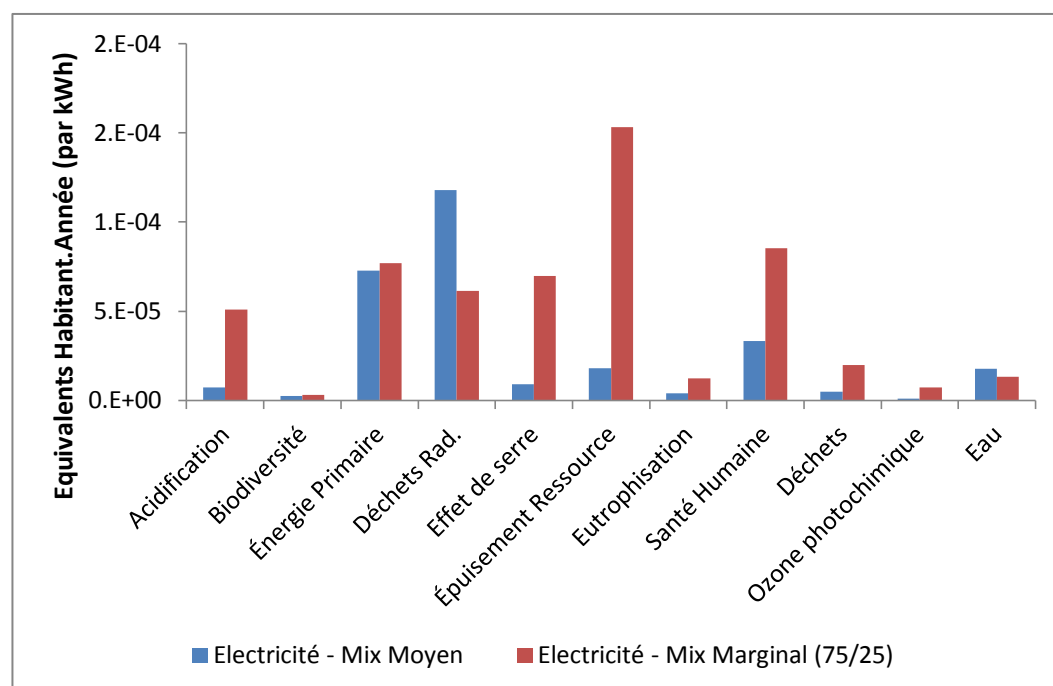


Figure 132 : Impacts environnementaux de la production d'électricité (équivalent habitant par kWh)

Les indicateurs dont la contribution en termes d'équivalents habitants-années diffère suivant le mix considéré sont :

¹⁰² Ces valeurs sont issues d'une étude menée en 2007 par l'ADEME et le gestionnaire du réseau électrique français (RTE), disponible sur le site suivant : www.agirpourenvironnement.org/pdf/contenuCO2longue.pdf. Des calculs plus précis sont proposés dans la suite de cette thèse, chapitres 3 et 4.

- déchets radioactifs et énergie primaire, supérieurs pour le mix moyen ;
- épuisement des ressources, acidification, santé humaine et effet de serre, supérieurs pour le mix marginal.

5.3.6.3. BILAN GLOBAL DANS LE CAS D'UNE RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

Cas général

Le bilan global pour l'incinération d'un déchet avec valorisation énergétique est donné par l'équation 5-11 :

$$I_{\text{déchet}} = I_{\text{généré}} - I_{\text{évité}} \quad 5-11$$

Le bilan global peut être négatif. Cependant, dans le cadre de l'évaluation environnementale attributionnelle d'un bâtiment ou d'un quartier, les impacts de fabrication des matériaux ou des biens devenant des déchets ménagers sont pris en compte dans l'étude. Aucune amélioration de l'évaluation globale n'est possible dans le cas où la quantité de déchets générés augmente¹⁰³. Dans le cas de l'approche conséquentielle-projet liée à l'écoconception des quartiers, les différentes variantes sont analysées à quantité de déchets traités identique (comportements des usagers identiques pour toutes les variantes de conception).

Incinérateur ne produisant que de la chaleur

En fonction du pouvoir calorifique inférieur du déchet et du rendement de l'incinérateur, les impacts évités sont calculés et retirés des impacts calculés précédemment. Le cas le plus favorable, celui d'une récupération d'énergie évitant l'utilisation de fioul est présenté Figure 133 pour les indicateurs de dommages à la santé humaine et de potentiel de réchauffement global. On considère un niveau de pertes de distribution de 12 %.

¹⁰³ Sauf éventuellement dans le cas du bois pour le potentiel de réchauffement global à cause du stockage de carbone biogénique

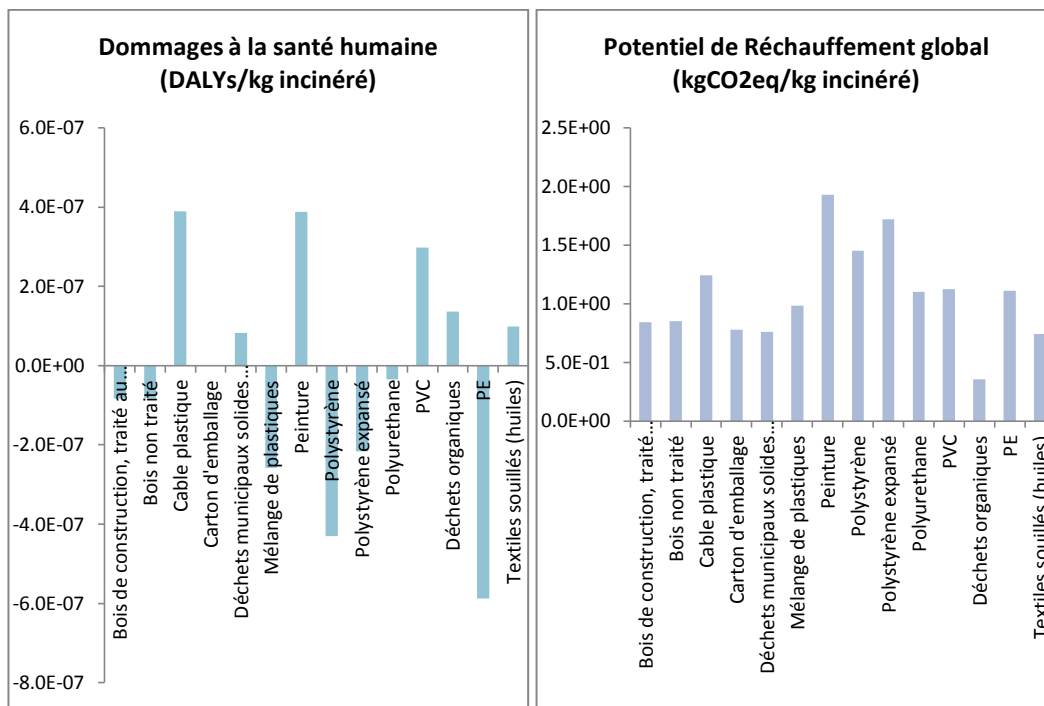


Figure 133 : Bilan d'une incinération avec récupération d'énergie sur du fioul

Les écarts entre les différents types de déchets sont significatifs pour les dommages à la santé humaine et le potentiel de réchauffement global. Pour les dommages à la santé humaine, certains impacts sont même largement négatifs (les impacts évités sont plus importants que les impacts générés), ce qui peut être lié à la formation de dioxines dans le cas du PVC.

En particulier, il semble important de considérer les peintures de façon indépendante : leur impact potentiel de réchauffement global, par exemple, est important et leur pouvoir calorifique est faible, ce qui conduit à un bilan final défavorable par rapport aux autres déchets. On constate également une variation significative des impacts entre les différents types de plastiques, notamment entre le PVC et le polyéthylène pour le cas des dommages à la santé humaine.

Le cas où l'utilisation de gaz est évitée (à la place du fioul) a également été calculé. La différence entre les deux choix pour l'indicateur potentiel de réchauffement global est présentée à la Figure 134.

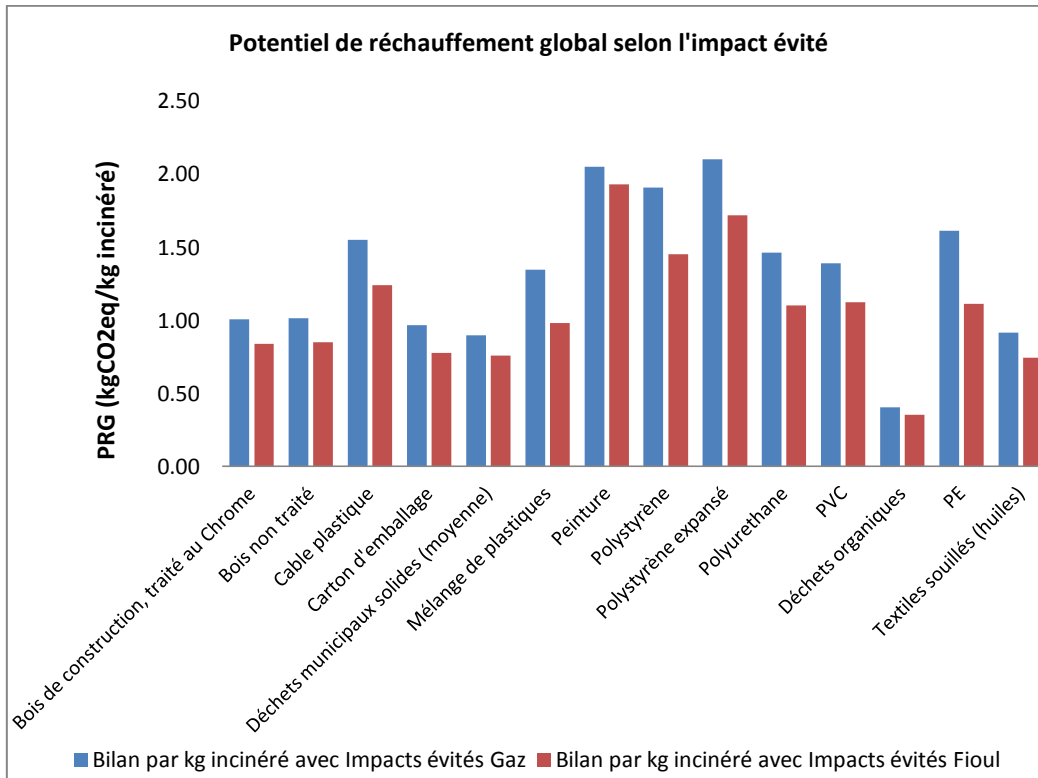


Figure 134 : Impact PRG selon le combustible évité

Le type d'impact évité affecte le bilan de manière différente selon le type de déchet considéré. Les peintures ou les déchets organiques ont un faible pouvoir calorifique, la quantité d'énergie qu'ils permettent de générer est donc faible et le bilan final est peu modifié par le type de combustible considéré pour l'impact évité. Au contraire, les plastiques ont globalement des pouvoirs calorifiques élevés parmi les déchets considérés, le bilan final peut alors varier fortement suivant le type d'impact évité (polyéthylène, polyuréthane).

Incinérateur ne produisant que de l'électricité

Ce cas représente un incinérateur produisant uniquement de l'électricité. Les pertes du réseau basse et moyenne tension sont estimées à 6%. La valeur du bilan final par déchet est présentée Figure 135 pour le potentiel de réchauffement global et les dommages à la santé humaine, avec un mix moyen ou un mix marginal.

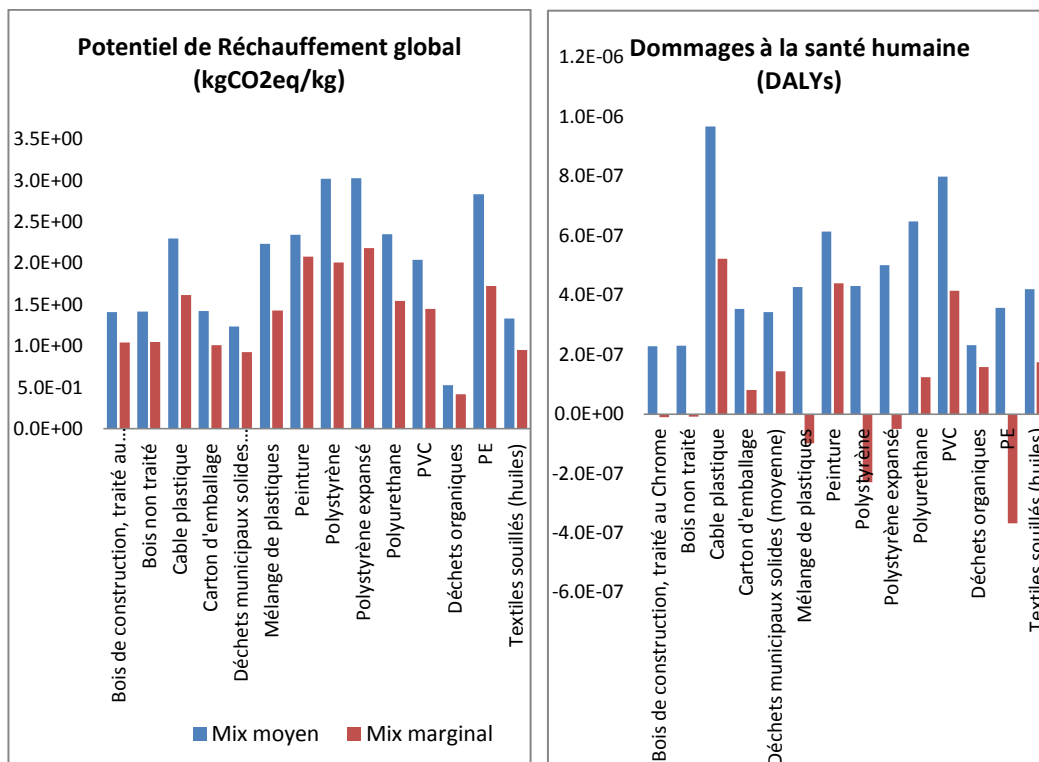


Figure 135 : Évaluation des impacts PRG et DALYs avec un mix moyen ou un mix marginal

Le choix du mix électrique évité a une influence forte sur le bilan final, notamment dans le cas des dommages à la santé humaine.

Incinérateur à cogénération

La cogénération permet d'optimiser le rendement global de l'installation. Les rendements thermique et électrique sur PCI sont posés respectivement à 27,9 % et 11,4 % (voir Tableau 43 paragraphe 5.3.6).

On considère ici le cas de trois déchets représentatifs : le bois non traité, les déchets municipaux solides moyens et un mélange de plastiques. La cogénération évite du fioul dans le cas de la chaleur et le mix marginal dans le cas de l'électricité. Les pertes de distribution sont incluses. Les résultats sont donnés Figure 136 pour les indicateurs de santé humaine et de potentiel de réchauffement global.

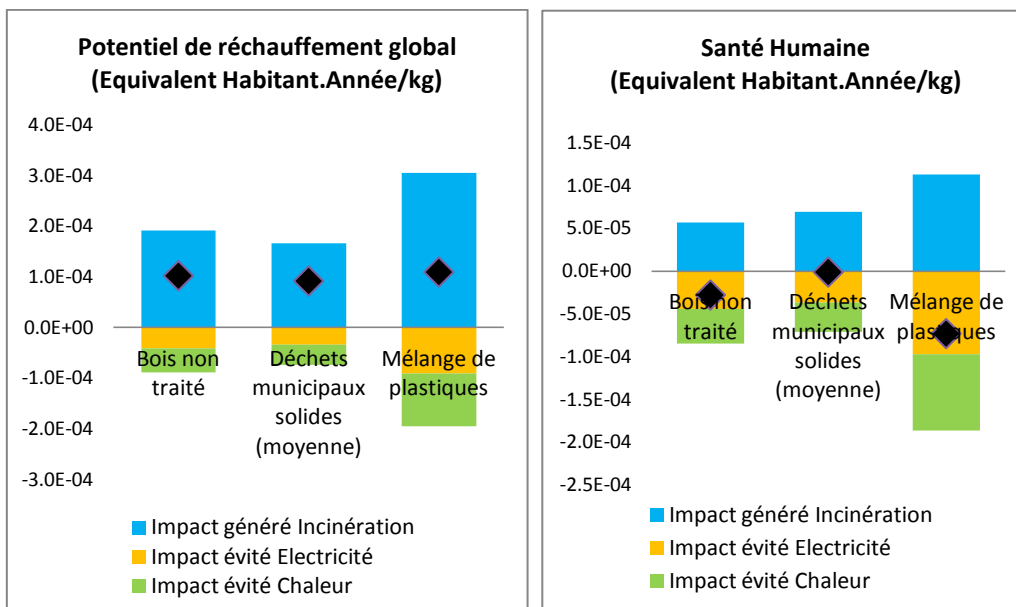


Figure 136 : Bilan environnemental de la cogénération (potentiel de réchauffement global et santé humaine) - Impacts évités : mix d'électricité marginal et chaleur à base de fioul

L'incinération du plastique sans récupération d'énergie génère des impacts importants, notamment concernant la toxicité humaine (valeur maximale parmi les six déchets représentés à la Figure 127, paragraphe 5.3.5) et le potentiel de réchauffement global (deuxième valeur maximale, après les peintures, à la Figure 127). Cependant, leur pouvoir calorifique élevé leur permet de produire une quantité importante d'énergie, ce qui induit un bilan global favorable.

Seulement 23 % des plastiques étaient recyclés en 2011 (Enquête Collecte ADEME 2011¹⁰⁴). Le taux de plastique recyclé dans l'industrie reste très bas (5,3 %) selon l'ADEME. La diversité des matières plastiques, souvent souillées et en petites quantités dans les déchets ménagers, en fait une matière difficile à collecter et à recycler aujourd'hui. En attendant que la filière de recyclage progresse, la valorisation énergétique est une option dont le bilan peut présenter des avantages selon les impacts effectivement évités.

Concernant le bois non traité, il est important de rappeler que 99 % de l'impact du potentiel de réchauffement global et 80 % des dommages à la santé humaine générés sont dus au carbone biogénique.

¹⁰⁴<http://www.ademe.fr/expertises/dechets/chiffres-cles-observations/dossier/flux-couts/collecte-dechets-service-public-france>.

5.3.7. Illustration sur un cas simple

5.3.7.1. DESCRIPTION DU CAS D'ÉTUDE ILLUSTRATIF

Le cas d'étude suivant est proposé pour illustrer la méthodologie : un projet de construction d'un ensemble de logements en petits collectifs est envisagé. La zone est desservie par un réseau de chaleur urbain comprenant un incinérateur de déchets ménagers et une chaufferie gaz. Les pertes sur le réseau de chaleur sont de 12 %. La variation des pertes suite à l'installation du nouveau quartier est supposée négligeable. Un rendement de 53,9 % pour la production de chaleur par l'incinérateur est considéré. Les immeubles ont une consommation finale d'énergie annuelle de 15 kWh.m⁻² pour le chauffage, 25 kWh.m⁻² pour l'ECS et 30 kWh.m⁻² pour l'électricité spécifique. Ils génèrent 16 kg. m⁻² de déchets ménagers dont la composition est détaillée dans le Tableau 46.

Tableau 46 : Composition des déchets ménagers pour le cas d'étude illustratif, adapté du bilan ADEME 2007 sur la composition moyenne nationale des ordures ménagères¹⁰⁵

	Déchets putrescibles	Papiers/cartons	Verres	Plastiques	Métaux	Autres
Pourcentage (%)	25	20	11	11	3	30
PCI (MJ/kg)	4	16	0	30	0	12
Traitement possible considéré	Compost. Incin.	Incin.	Recycl.	Incin.	Recycl.	Incin.

Deux questions de conception sont étudiées par analyse du cycle de vie sur les indicateurs de contribution au changement climatique et de dommages à la santé humaine (changement climatique exclu) :

- Q1 : Est-il préférable de relier les nouveaux bâtiments au réseau de chaleur urbain ou d'installer des chaudières collectives (gaz) dans chaque immeuble ?
- Q2 : Quel est l'impact de la mise en place d'un compost collectif de quartier pour jardin partagé en considérant que 50 % des déchets putrescibles seraient compostés ?

5.3.7.2. Q1 : CHAUFFAGE URBAIN OU CHAUDIÈRE COLLECTIVE ?

Le réseau de chauffage urbain ou les chaudières collectives vont permettre de satisfaire les besoins énergétiques de chauffage et d'ECS. Les impacts d'une chaudière collective gaz par kWh fourni sont directement extraits de la base de données ecoinvent v3.2. Ils sont donnés dans le Tableau 47.

¹⁰⁵ <http://www.ademe.fr/expertises/dechets/chiffres-cles-observations/dossier/caracterisation-dechets/campagne-nationale-caracterisation-dechets-menagers-assimiles>

Tableau 47 : Impacts de la fourniture de chaleur par des chaudières collectives

	Effet de serre (IPCC2007 – GWP100)	Dommages à la santé (EI99 – effet de serre exclu)
Unité de l'indicateur	g CO2 eq (kg)	DALYs (year)
Impact par kWh	245	4,9.10e-8

Les impacts de l'incinération des déchets du quartier seront effectifs, que les bâtiments soient ou non reliés au réseau de chaleur. Ces impacts sont exclus des frontières de l'étude comparative.

Chaleur finale produite par l'incinération des déchets

La quantité de chaleur finale produite grâce à l'incinération des déchets des nouveaux logements est donnée par l'équation suivante :

$$Q = \sum_d K_d \times PCI_d \times R_{in} \times (1 - l_{rés}) \quad 5-12$$

où d représente un type de déchet, K_d la quantité de ce déchet, R_{in} représente le rendement de l'incinérateur (53,9 %) et $l_{rés}$ représente les pertes du réseau de chaleur urbain (12 %). L'application de cette équation au problème décrit donne une quantité de chaleur générée annuelle de 23,4 kWh.m⁻², ce qui est pratiquement équivalent aux besoins pour l'ECS.

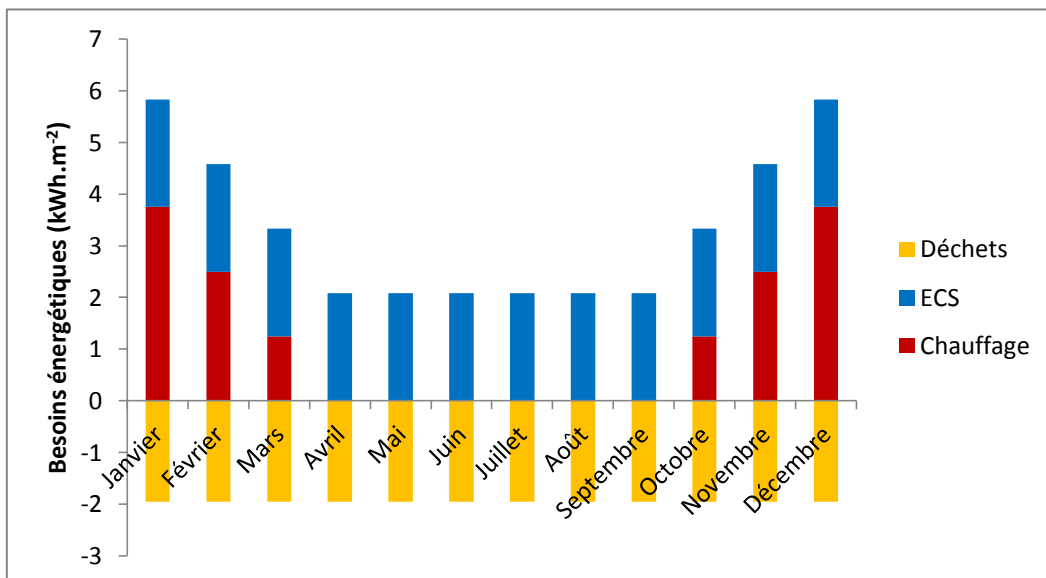


Figure 137 : Synthèse mensuelle des besoins énergétiques en chauffage et ECS et de la chaleur finale générée par l'incinération des déchets

Impacts évités par l'incinération des déchets

L'incinérateur est considéré comme ayant de la capacité disponible. Deux cas de figure sont possibles :

- scénario 1 : le gaz est la technologie marginale de production de chaleur sur l'ensemble de l'année ;
- scénario 2 : l'incinérateur produit de la chaleur en surplus en période estivale, l'utilisation de cette chaleur ne donne lieu à aucune conséquence environnementale pour les nouveaux logements dans ce cas. Le gaz est la technologie marginale seulement durant la période de chauffe.

La synthèse des impacts pour les deux scénarios est présentée à la Figure 138.

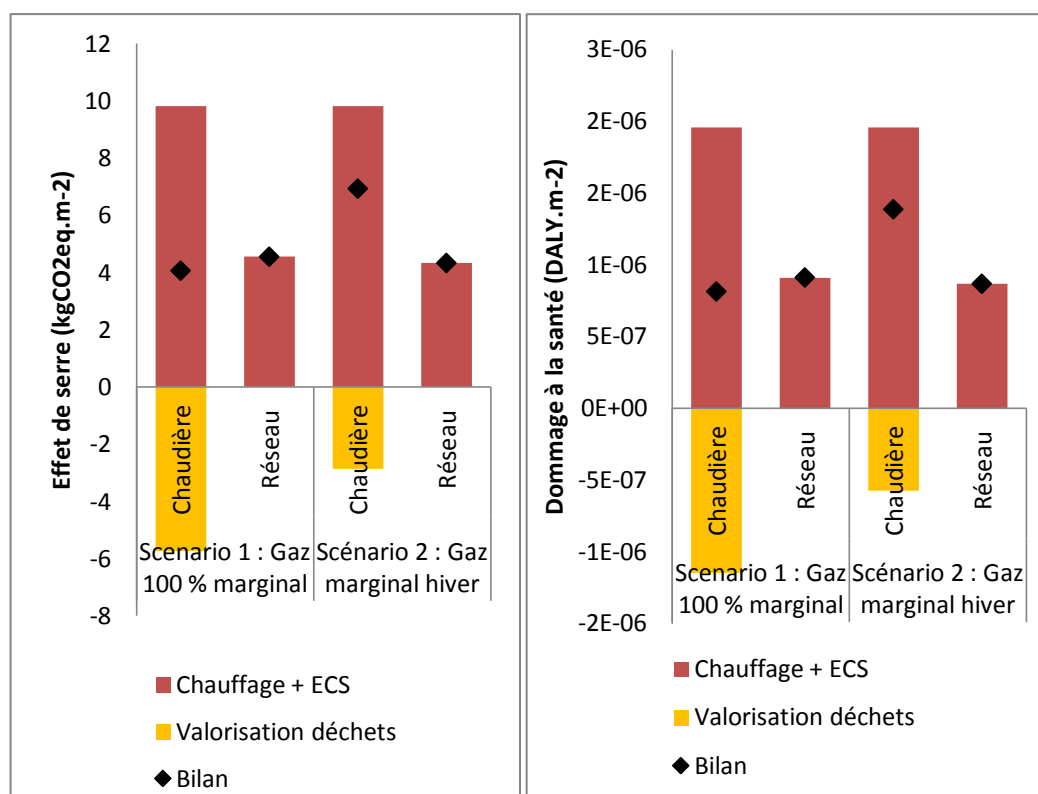


Figure 138 : Conséquences environnementales du raccordement des nouveaux logements au réseau de chaleur (Réseau) ou de l'installation de chaudières collectives (Chaudière) selon la situation de l'incinérateur (production de base complétée par le gaz toute l'année – scénario 1 ou production en surplus d'été et complément gaz seulement en hiver – scénario 2)

Ce cas simple illustre l'importance de la prise en compte des contraintes locales du réseau de chaleur urbain. En fonction du niveau de saturation de l'incinérateur et de la technologie marginale de production de chaleur, le raccordement au réseau de chaleur peut être plus ou moins favorable par rapport à la mise en place de chaudières collectives en pied d'immeuble. Les résultats sont similaires pour les deux indicateurs évalués.

5.3.7.3. Q2 : IMPACT DU COMPOSTAGE DE QUARTIER

À partir de ce même contexte d'étude, la question de l'impact de la mise en place d'un système de compost collectif dans le quartier est étudiée. L'installation du compost diminue de moitié la quantité de déchets putrescibles incinérés. L'incinérateur de chaleur va produire moins, cette baisse de production sera compensée par le gaz si la production est inférieure à la demande en chaleur. Le compost permet d'éviter l'utilisation de fertilisants artificiels. Selon les données de la base ecoinvent, un kg de compost équivaut à 7 g d'engrais azotés, 4 g de phosphore et 6 g de potassium. La chaîne de conséquences associée à la mise en place du compost est représentée à la Figure 139. Les impacts environnementaux de chaque conséquence finale doivent être déterminés.

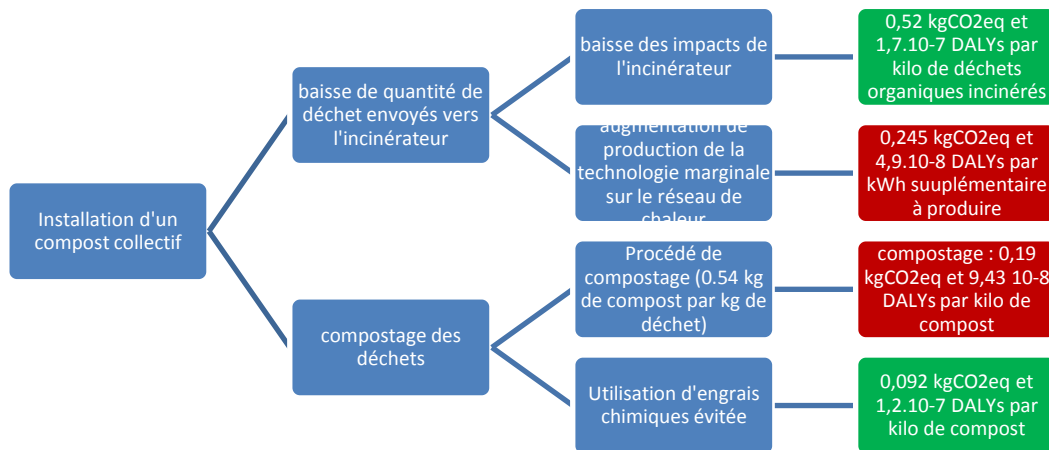


Figure 139 : Conséquences de la mise en place d'un compost collectif

Le bilan environnemental de l'introduction d'un compost collectif dans le quartier est présenté sur la Figure 139 pour les deux options considérées précédemment :

- scénario 1 : le gaz est toujours la technologie marginale sur le réseau de chaleur (toute baisse de production équivaut à une augmentation équivalente de la consommation du gaz) ;
- scénario 2 : l'incinérateur est en situation de surplus en période estivale ; diminuer la quantité de déchet incinérés à ce moment-là n'engendre pas d'augmentation de consommation de gaz par le réseau. En revanche, la diminution de la quantité de déchets incinérés en période de marginalité du gaz (en hiver) entraîne une consommation accrue de gaz sur le réseau de chaleur urbain.

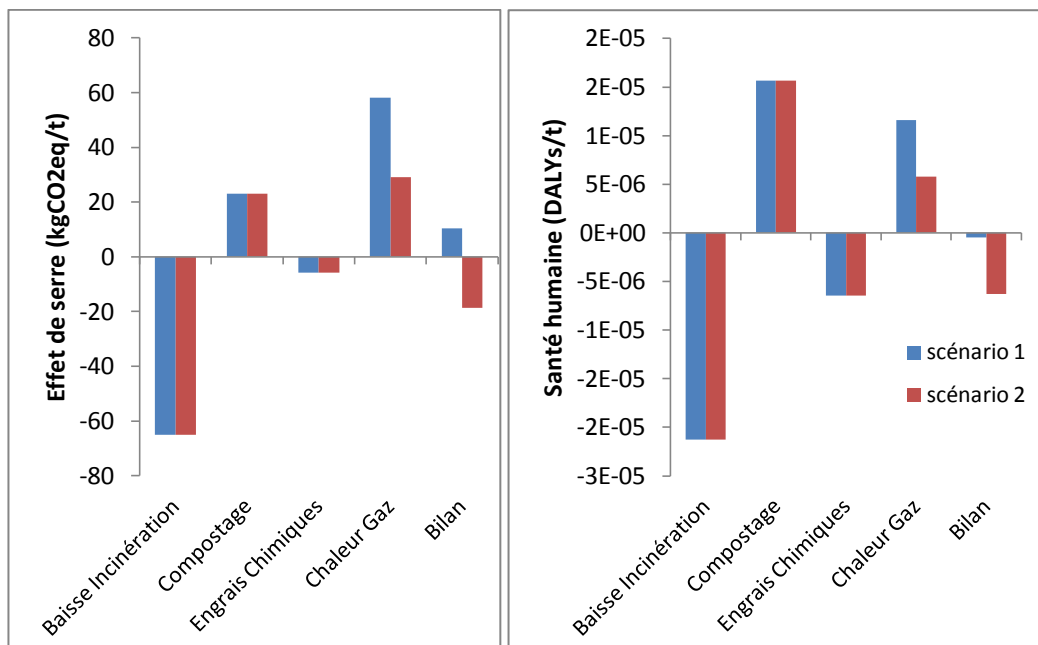


Figure 140 : Bilan de la variation des impacts pour une tonne de déchets ménagers compostés pour le scénario 1 (gaz marginal toute l'année sur le réseau de chaleur) et le scénario 2 (gaz marginal seulement en hiver)

Là encore, la prise en compte des contraintes pesant sur le réseau de chaleur urbain peut être de nature à changer le bilan final. Si les deux options sont favorables à la mise en place d'un système de compost collectif concernant l'indicateur de dommages à la santé humaine, les résultats sont plus contrastés pour le cas de l'effet de serre.

5.4. CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce chapitre propose une prise en compte des contraintes existantes au niveau local dans l'analyse de cycle de vie des quartiers. Les cas des transports et des déchets ménagers sont en particulier traités. Ils interagissent de façon forte avec le parc bâti et sont pourtant souvent étudiés séparément. Le travail proposé ici pose les fondements d'un cadre méthodologique multidisciplinaire intégré bâtiment-transport-déchets. Un couplage entre un outil de simulation de la mobilité urbaine et l'analyse de cycle de vie est proposé pour intégrer le contributeur transport à l'ACV des quartiers. L'intérêt d'une vision pluridisciplinaire et multi-échelle du quartier est illustré dans le cas des déchets ménagers. Dans les deux cas, l'approche de modélisation est discutée selon la nature attributionnelle ou conséquentielle de l'étude.

Le cas des transports illustre la difficulté de choisir une échelle d'analyse adaptée à la fois au bâtiment et aux réseaux de transport. Les aménagements prévus dans le cadre d'un projet de développement urbain dépassent souvent l'échelle du quartier mais l'extension du périmètre d'étude du quartier à une partie de ville voire à une ville entière est une question qui reste en suspens. Elle nécessite pour être résolue un changement d'échelle et une augmentation de la complexité des études qui vont bien au-delà du passage du bâtiment au quartier.

L'apport de l'outil de modélisation des transports en termes de spatialisation des impacts n'a pas été exploité pour améliorer la caractérisation des impacts. Cela constitue une perspective de recherche importante qui pourrait étoffer les travaux existants sur ce thème (Hauschild, 2006a ; Azevedo et al., 2013). L'utilisation des outils SIG, notamment, est vue comme une opportunité majeure pour améliorer la précision des ACV (Hellweg et Canals, 2014). Des couplages ont déjà été réalisés pour améliorer l'évaluation des impacts sur la biodiversité (Geyer et al., 2010). À l'échelle urbaine, les outils SIG pourraient constituer à terme une base d'informations commune pour les outils d'évaluation des transports, de la biodiversité locale et les outils d'ACV.

L'analyse de cycle de vie est une méthode d'évaluation environnementale. Elle ne peut remplacer les discussions entre les parties prenantes, ni traiter des conséquences environnementales locales d'un projet. Si la méthode du coût global (*Life cycle cost*) est bien développée, l'ACV sociale est encore peu mature. Malgré ces limites, l'ACV environnementale synthétise dans une évaluation quantifiée et objective les conséquences environnementales associées à un projet, de la façon la plus exhaustive possible. Elle constitue à ce titre une base de discussion commune pour les acteurs intervenant dans des projets de développement ou de requalification urbaine.

Chapitre 6. Étude de cas : la Cité Descartes

6.1. INTRODUCTION

L'objectif dans ce chapitre est d'appliquer l'approche conséquentielle-projet au cas de la conception d'un quartier neuf. Les mêmes principes sont transposables pour le cas d'un projet de réhabilitation. Les différentes méthodologies présentées dans les chapitres précédents sont utilisées afin de générer une approche conséquentielle-projet la plus complète possible, telle que décrite dans le Chapitre 1.

À partir du plan masse, une variante de référence « réglementaire », correspondant au minimum (actuel) requis par la réglementation en matière de performance énergétique, et aux techniques de construction usuelles est définie. Les résultats de l'évaluation environnementale de cette variante de référence permettent une analyse des contributeurs principaux (bâtiments, déchets, transports).

Deux variantes de conception des bâtiments sont ensuite comparées au projet de référence (conforme à la RT2012) :

- une variante « BBC+PV » avec une performance énergétique identique à la variante passive mais comprenant en plus un système de production d'électricité renouvelable (système photovoltaïque).
- une variante « PAS+PV » avec des besoins de chauffage par bâtiment inférieurs à $15 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ et une très bonne étanchéité à l'air en sus du système photovoltaïque ;

Dans un premier temps, le projet et son contexte sont décrits succinctement. Les hypothèses nécessaires pour la réalisation de l'étude thermique sont ensuite présentées, suivies des résultats de la simulation thermique dynamique et de la simulation transport. La section suivante concerne les différentes hypothèses de modélisation spécifiques à l'analyse de cycle de vie.

Une dernière partie concerne l'exposition et l'interprétation des résultats de l'étude ACV, selon les différents points de vue proposés : analyse des contributeurs de la variante de référence, comparaison de variantes programatiques, comparaison de variantes de conception des bâtiments, focus sur le traitement des déchets, prospective énergétique.

Les différences entre approche attributionnelle et approche conséquentielle sont discutées.

6.2. CITÉ DESCARTES

6.2.1. Description du projet

Le projet étudié est un projet de construction d'un quartier neuf situé sur le cluster de la cité Descartes. La Cité Descartes est un pôle de recherche et d'enseignement situé à Marne-La-Vallée, dans l'Est parisien (voir Figure 141). Elle s'étend sur 123 hectares et comprend aujourd'hui l'Université de Marne-la-Vallée, une vingtaine de grandes écoles, plus de 50 laboratoires de recherche, un incubateur d'entreprises innovantes et près de 300 sociétés. Le développement du cluster Descartes s'inscrit dans le projet du « Grand Paris » et se veut une vitrine de la ville durable.



Figure 141 : Situation géographique du cluster Cité Descartes, (source : <http://marne.artefacto.fr/?l=fr>)

Selon l'EPA Marne¹⁰⁶, organisme responsable de la coordination du développement de la Cité Descartes, les objectifs du nouveau quartier prévu sont :

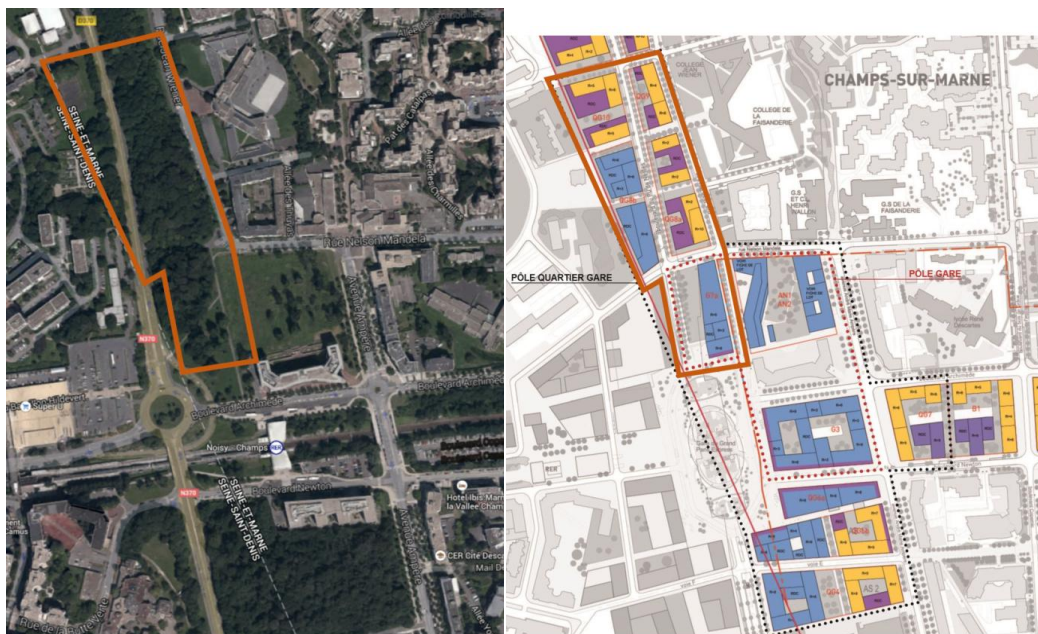
- Répondre à la demande de logements sur le territoire.
- Accueillir des entreprises tertiaires en lien avec les activités développées au sein du cluster Descartes.
- Disposer d'une offre de services et de commerces permettant d'assurer une grande qualité de vie aux usagers du secteur.

¹⁰⁶ <http://projets.epa-marnelavallee.fr/Descartes/Le-projet-urbain>

- Renforcer l'accessibilité du site.
- Développer des équipements structurants.
- Produire un quartier à faible empreinte carbone en utilisant au mieux les mix énergétiques renouvelables : géothermie, biomasse, photovoltaïque, énergie fatale, etc.

Le programme complet prévoit la construction de 840 000 m² de bâtiments dont 400 000 m² de bureaux, 280 000 m² de logements et 20 000 m² de commerces et services. Le projet étudié porte sur une partie seulement de ces aménagements, concernant 4300 m² de commerces, 44 360 m² de bureaux et un peu plus de 32 500 m² de logements.

Dans le cadre de ces travaux, seule une partie du projet d'aménagement est donc étudiée, représentée dans la Figure 142 par le périmètre orange, pour une aire totale concernée de 40 037 m². Le projet est situé sur une zone actuellement boisée, sur un tissu urbain discontinu (dent creuse).



a) Etat actuel : Image satellite de la zone du projet b) Projet d'aménagement : Ru de Nesles

Figure 142 : Projet d'aménagement du nord du Boulevard du Ru de Nesles : zone étudiée entourée en orange. (tirée de Mailhac, 2015)

Un premier plan masse réalisé par le cabinet d'architecture et d'urbanisme « Atelier Lion » a été présenté aux élus de Champs-sur-Marne et de Noisy-le-Grand, et constitue notre base de travail. Les principales données programmatiques sont présentées dans le Tableau 48.

Tableau 48 : Données programmatiques (tiré de Mailhac, 2015)

	Valeur [en m ²]
Aire totale du projet	40 037
Surface totale d'espaces verts	9 546
Surface totale de trottoir	4 435
Surface totale de route	9 804
Emprise au sol des bâtiments	16 252
Surface de bâtiments de logements collectifs prévus	33 124
Surface de bâtiments de bureaux prévus	44 758
Surface de bâtiments de commerces prévus	3 829
Nombre d'habitants du projet	1060
Nombre d'employés de bureau du projet	3715
Nombre d'employés de commerce	176

6.2.2. Simulation Thermique Dynamique (STD)

6.2.2.1. SAISIE GRAPHIQUE

Sur la base des fichiers Autocad produits par le cabinet d'architecte, l'ensemble du projet a été saisi dans le logiciel Alcyone (voir Figure 143).

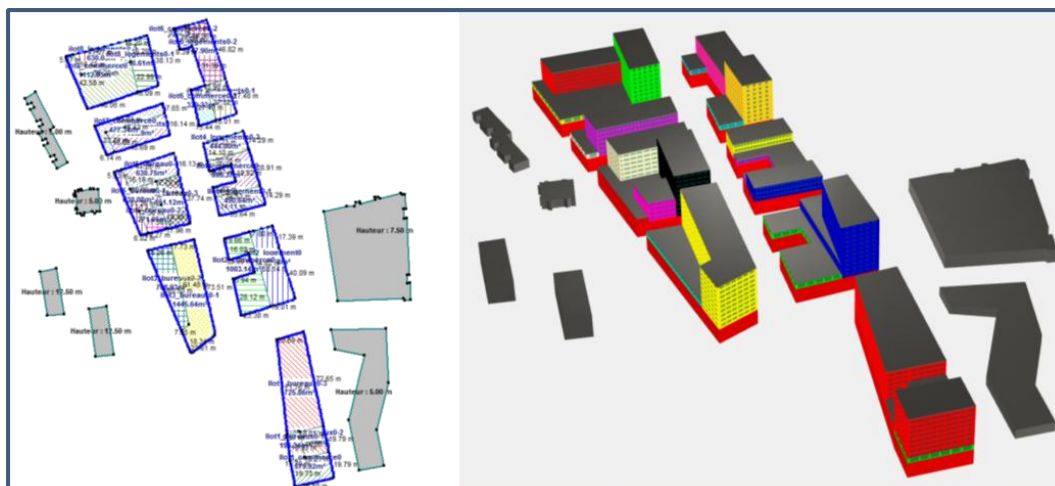


Figure 143 : Saisie graphique du projet avec Alcyone

Le zonage thermique est fait en respectant les règles suivantes :

- un seul usage par zone thermique (logements, bureaux, commerces ou sous-sols) ;
- différenciation selon l'orientation ;

- locaux disjoints mais à l'exposition similaire et ayant le même usage pouvant être placés dans une même zone.

Il est important de ne pas multiplier les zones thermiques afin de conserver un temps de calcul raisonnable pour la simulation thermique dynamique.

6.2.2.2. HYPOTHÈSES SUR L'ENVELOPPE ET LE FONCTIONNEMENT

La composition des parois est présentée dans le Tableau 49.

Tableau 49 : Composition des parois

Parois	Variante RT2012 (BBC et BBC+PV)	Variante Passive (PAS+PV)
Mur extérieur	16 cm de béton lourd, isolation intérieure en polystyrène expansé de 15 cm, lame d'air de 1,5 cm et placoplâtre de 1,3 cm. Résistance thermique mur = 4,1 m ² .K.W ⁻¹	16 cm de béton lourd et isolation extérieure en polystyrène expansé de 25 cm Enduit extérieur 1,5 cm, parement intérieur placoplâtre 1,3 cm Résistance thermique mur = 7,8 m ² .K.W ⁻¹
Mur intérieur	Placoplâtre BA 13 (1,3 cm) Béton lourd 15 cm Placoplâtre BA 13 (1,3 cm)	Placoplâtre BA 13 (1,3 cm) Béton lourd 15 cm Placoplâtre BA 13 (1,3 cm)
Toiture	Feutre bitumineux 0,5 cm Polyuréthane 20 cm Béton lourd 20 cm Plâtre gypse 1,0 cm Résistance thermique = 8,1 m ² .K.W ⁻¹	Feutre bitumineux 0,5 cm Polyuréthane 25 cm Béton lourd 20 cm Plâtre gypse 1,0 cm Résistance thermique = 10,1 m ² .K.W ⁻¹
Plancher bas	Béton lourd 20 cm Polystyrène expansé 15 cm Résistance thermique = 4,0 m ² .K.W ⁻¹	Béton lourd 20 cm Polystyrène expansé 30 cm Résistance thermique = 7,8 m ² .K.W ⁻¹
Plancher intermédiaire	20 cm de béton lourd	20 cm de béton lourd

De l'acier est intégré au béton lourd afin de tenir compte des armatures. On considère un pourcentage d'acier de 3 % en masse dans les murs et les planchers.

Scénarios de fonctionnement

Afin d'améliorer le réalisme de l'étude, les scénarios de fonctionnement issus des travaux de Vorger (2014) sur le comportement des occupants ont été utilisés autant que possible. Dans ces travaux, on constate qu'un foisonnement peut être considéré à partir de la simulation d'environ 100 logements ou bureaux. La taille du quartier est donc largement assez grande pour pouvoir utiliser des scénarios foisonnés.

La différence entre ces scénarios issus de données statistiques et les scénarios réglementaires peut être très importante. Un exemple est donné à la Figure 144 sur la comparaison entre le scénario réglementaire et le scénario issu du modèle

de Vorger sur la puissance dissipée (appareils électroménagers et éclairage) dans un appartement.

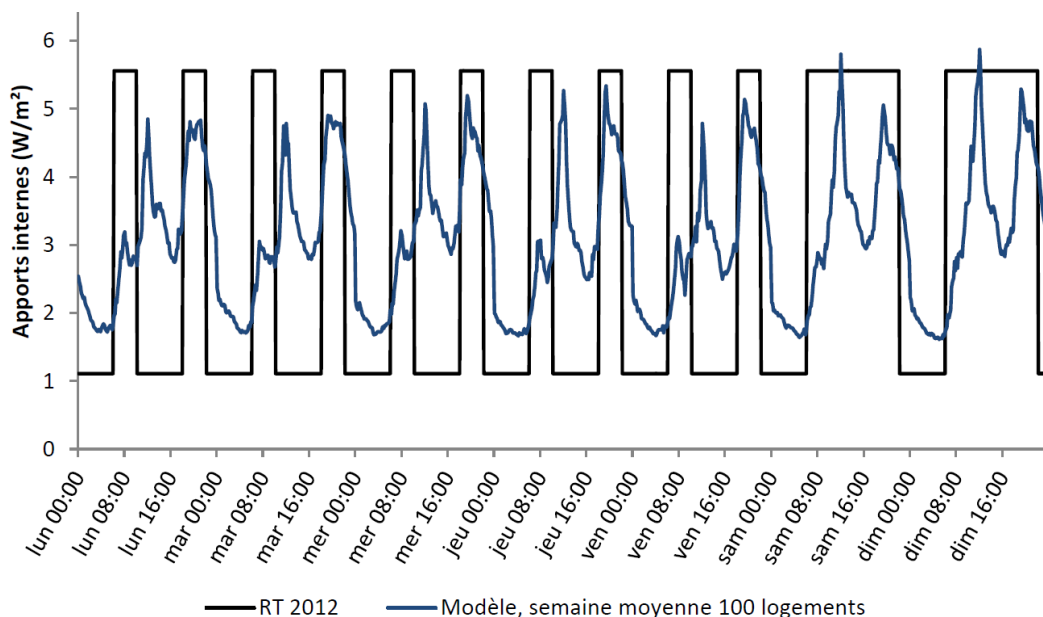


Figure 144 : Scénario hebdomadaire d'apports internes, moyenne pour 100 logements sur une année, comparaison entre le modèle statistique de Vorger (bleu) et la réglementation thermique RT2012 (noir). Figure extraite de (Vorger, 2014), p.344

Des scénarios d'occupation et de puissance dissipée (dont on extrait également l'éclairage) sont disponibles pour les logements et les bureaux. Ils ne sont pas disponibles pour les commerces pour lesquels les scénarios réglementaires ont donc été utilisés.

Les scénarios de ventilation contrôlée et d'infiltrations sont donnés dans le Tableau 50 pour les deux variantes BBC et passive.

Tableau 50 : Scénarios de ventilation et d'infiltrations

	Variante RT2012 (BBC et BBC+PV)	Variante Passive (PAS+PV)
Ventilation contrôlée	0,5 vol.h ⁻¹ Simple flux 0,1 Wh.m ⁻³	0,5 vol.h ⁻¹ Double-flux (logements/bureaux) Efficacité de l'échangeur : 0,8 Bypass estival 0,2 Wh.m ⁻³
Infiltrations¹⁰⁷	Logements : 0,05 vol.h ⁻¹ Bureaux : 0,1 vol.h ⁻¹ Commerces : 0,3 vol.h ⁻¹	Logements : 0,05 vol.h ⁻¹ Bureaux : 0,1 vol.h ⁻¹ Commerces : 0,3 vol.h ⁻¹

¹⁰⁷ Les infiltrations sont supposées identiques dans les deux variantes en considérant que la meilleure étanchéité à l'air dans la variante passive est compensée par l'augmentation des infiltrations causées par la ventilation double-flux.

Équipement de production d'énergie renouvelable : photovoltaïque

Afin de produire un maximum d'électricité sur le quartier, une exo-structure a été choisie pour installer les panneaux. Elle permet l'installation de 7898 m² de panneaux photovoltaïques contre 2000 avec une implantation en shed (Mailhac, 2015). L'implantation en exo-structure impose une inclinaison de 5 % des modules alors que l'implantation en shed permet d'optimiser l'inclinaison à 33 %. Le rendement est donc moins bon en exo-structure.

La production horaire sur une météo type (RT2012) de l'installation photovoltaïque a été évaluée grâce au logiciel COMFIE (Guiavarch et Peuportier, 2006). La production totale annuelle est évaluée à 911MWh. La production mensuelle est donnée à la Figure 145.

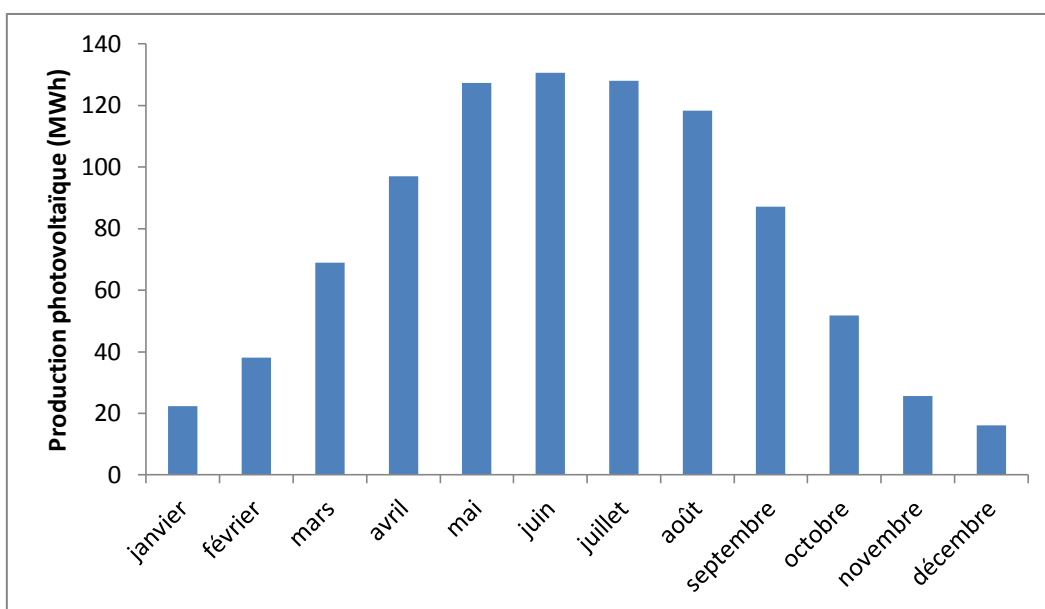


Figure 145 : Production photovoltaïque mensuelle pour l'année météo type, station de Trappes (RT2012)

6.2.2.3. RÉSULTATS DE LA STD

Les résultats de la STD pour les besoins de chauffage et de climatisation sont donnés dans le Tableau 51 pour les différentes variantes de conception considérées. La variante BBC+PV a les mêmes caractéristiques d'enveloppe que la variante BBC.

Tableau 51 : Besoins énergétiques calculés par STD

kWh.m ² annuels	BBC (RT2012) et BBC+PV	PAS+PV
Chauffage	18 (5 à 65)	2 (1 à 11)
Climatisation	1 (0 à 5)	0 (0 à 5)
Eau chaude sanitaire	11,5	11,5
Electricité spécifique (hors éclairage et ventilation)	31,3	31,3
Eclairage	9,5 (2,8 pour les logements à 12,5 pour les commerces)	9,5
Ventilation	0,6	1,1
Production PV	11,2	11,2

Les besoins de chauffage de la variante passive sont fortement réduits par rapport à la variante BBC. Ceux-ci sont déjà relativement bas en moyenne dans la variante BBC (inférieur à 20 kWh.m⁻²) mais varient de façon importante d'une zone thermique à l'autre : de 5 kWh/m² dans les bureaux les mieux exposés à 65 dans les commerces les moins bien situés (RDC orientés Nord). Les faibles besoins de chauffage s'expliquent en partie par les apports internes importants dans les bureaux. Les fortes consommations dans les commerces s'expliquent par un taux d'infiltration élevé (entrée-sortie des clients) et dans la variante passive, également par le fait que ces zones ne sont pas équipées de double-flux.

Les exigences des labels portent sur un bâtiment dans son ensemble et pas seulement sur une zone. Ici la différence entre les zones est importante (surtout à cause du cas particulier des commerces), mais chaque bâtiment respecte les seuils de consommation prévus. De plus, des scénarios spécifiques ont été utilisés ici et non des scénarios réglementaires, ce qui modifie également les résultats par rapport à un calcul réglementaire. L'objectif est de définir différents niveaux de performance énergétique pour comparer les performances environnementales en ACVC-P (ACV conséquentielle-projet) et non de fournir un calcul réglementaire en vue de certifier la conformité du projet à un label ou une réglementation.

Seuls les commerces et les bureaux sont climatisés et des scénarios d'occultation (dans l'ensemble des zones) et de ventilation nocturne estivale (10 vol/h dans les logements, 3 vol/h dans les commerces et les bureaux) ont été intégrés pour tenir compte du comportement des occupants en situation de forte chaleur (logements) et de systèmes de *free cooling* (bureaux/commerces)¹⁰⁸. Cela contribue à baisser de façon significative la charge de climatisation. Comme pour le chauffage, des disparités importantes entre les différentes zones climatisées sont notables, avec des besoins allant de 0 à 5 kWh.m⁻². Les variantes ont des besoins de climatisation relativement proches. Les apports internes sont importants dans les deux cas et constituent la principale source de besoins de

¹⁰⁸ La ventilation nocturne estivale est effective si la température de la zone dépasse 23 °C et si la température extérieure est inférieure à la température de la zone.

rafraîchissement. La présence de planchers lourds dans l'ensemble des variantes donne une inertie moyenne même pour la variante BBC.

Le bilan mensuel des besoins en énergie utile par poste et en consommation d'énergie finale par vecteur est donné à la Figure 146. Une ventilation double flux est installée dans la variante PAS+PV, ce qui conduit à une consommation de ventilation plus forte que pour la variante BBC. La saisonnalité des usages est beaucoup plus marquée pour la variante BBC que pour la variante PAS+PV. De plus la période de consommation maximale en électricité pour les variantes avec PV correspond à la période de production maximale du système photovoltaïque.

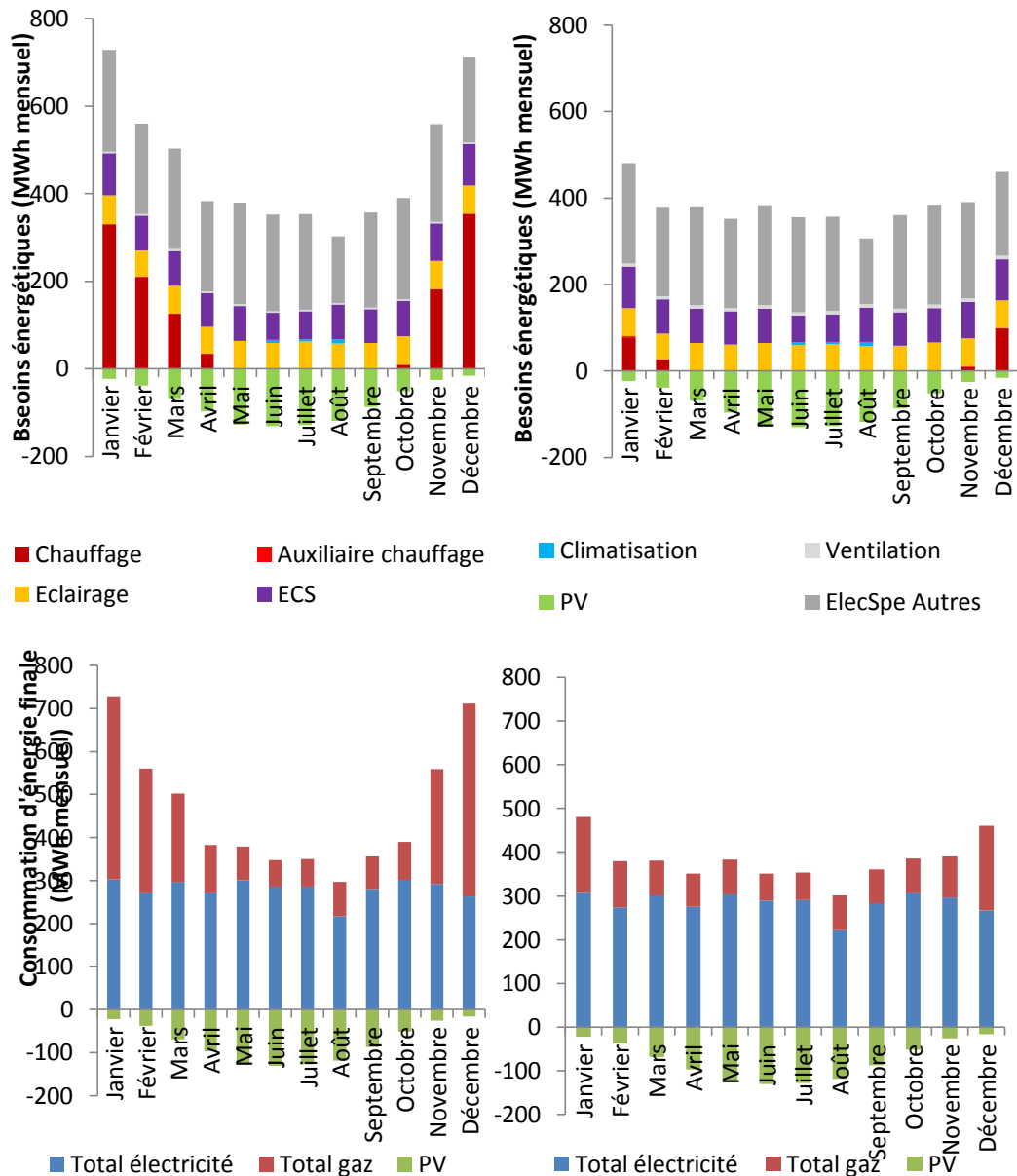


Figure 146 : Bilan mensuel des besoins (haut) et consommations d'énergies finales (bas) sur l'ensemble des zones, variante BBC/BBC+PV (gauche) et PAS+PV (droite)

6.2.3. Simulation Transport

Les flux de mobilité ayant lieu dans la zone urbaine dans laquelle est intégré le projet, dénommée « Cité Descartes élargie », sont déterminés à l'aide d'un outil de simulation transport. L'outil a été décrit dans le Chapitre 5. La Figure 147 présente la Cité Descartes élargie et la position du projet étudié.

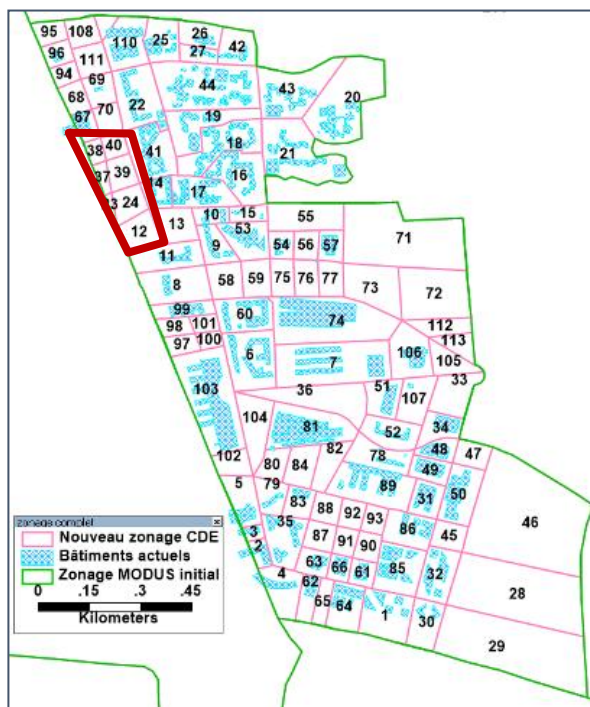


Figure 147 : Cité Descartes élargie et emplacement du projet étudié (entouré en rouge)

L'outil de simulation de la mobilité urbaine détermine pour chaque sous-zone (en rose dans Figure 147) les flux émis et reçus. Les distances annuelles de transport générées par attribut (usager du quartier, voir définition au Chapitre 5, paragraphe 5.2.2) pour chaque mode et pour les sous-zones correspondant au projet étudié sont présentées à la Figure 148. Ce ne sont pas seulement les usagers du quartier qui se déplacent. Les visites, rendez-vous, etc. générés par l'activité du quartier sont également pris en compte.

Les résultats obtenus par le modèle correspondent aux observations moyennes des enquêtes transport. Cependant, les différentes sous-zones et bâtiments du projet peuvent être différenciés selon leurs accessibilités et leurs usages. Des stratégies différenciées peuvent être mises en place. Les attributs des sous-zones 12, 23 et 37 (bureaux) ont une demande de mobilité plus forte et une utilisation de la voiture particulière plus importante que les usagers des sous-zones alentours (résidentielles).

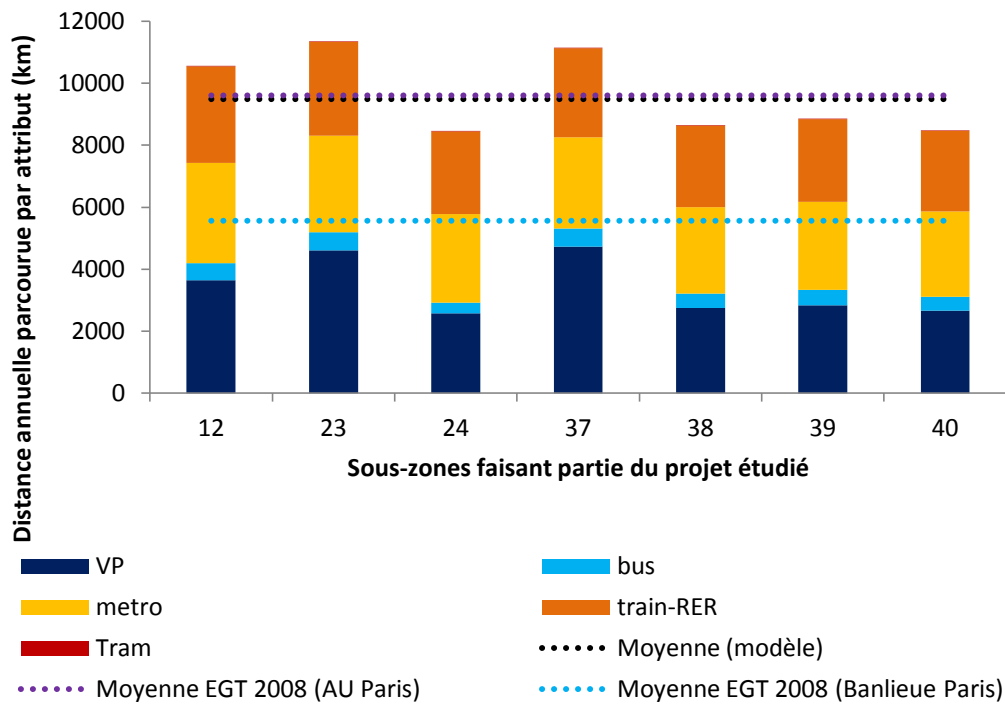


Figure 148 : Distance parcourue par usager par mode. Les moyennes EGT 2008 AU Paris et Banlieue Paris correspondent respectivement à 38 km et 22 km par personne par jour ouvrable de semaine¹⁰⁹ et 253 jours ouvrables de semaine par an

Le modèle permet également de déterminer les émissions de CO₂, de NO_x et de particules fines associées aux flux de véhicules particuliers entrant et sortant du quartier. La moitié de ces flux est allouée au quartier. La quantité d'émission par unité de distance (km) calculée par le modèle est donnée dans le Tableau 52.

¹⁰⁹ Voir la Revue du CGDD : La mobilité des Français, Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008, p12 (www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rev3.pdf)

Tableau 52 : Émissions locales par kilomètre parcouru en véhicule particulier, évaluées par le modèle de simulation transport pour les 7 sous-zones correspondant au projet étudié

Zones	gCO ₂ /km	mgNox/km	mgPM/km
12	157	301	5,82
23	158	272	5,78
24	156	299	5,80
37	157	271	5,76
38	157	276	5,77
39	157	269	5,76
40	157	278	5,77
moyenne	157	278	5,77

Les émissions moyennes de CO₂ par km restent très proches de la valeur moyenne de 158 gCO₂.km⁻¹ (entre 99 % et 103 %) alors que les émissions de NO_x sont plus dispersées suivant les sous-zones, de 269 à 301 mgNO_x.km⁻¹. Les deux sous-zones dont les taux de NO_x sont les plus hauts (12 et 24) correspondent à deux zones qui ne sont pas directement liées à l'axe rapide du boulevard du Ru de Nesle. Les usagers en partance ou à destination des sous-zones 12 et 24 ont une proportion plus importante de leur trajet se déroulant à vitesse réduite (inférieure ou égale à la vitesse libre : 40 km.h⁻¹) que les usagers des sous-zones directement reliées au boulevard du Ru de Nesle (vitesse libre est de 60 km.h⁻¹ (voir Annexe R)).

Si un phénomène de congestion résultait de cette simulation, les émissions de CO₂ par kilomètre augmenteraient de façon conjointe aux émissions de NO_x, ce qui n'est pas le cas. La conclusion de cette analyse est l'absence de phénomène de congestion important dans cette zone urbaine. Les aménagements prévus dans le cadre du Grand Paris Express (<https://www.societedugrandparis.fr>) comme la construction d'une ligne de métro en rocade et d'une ligne de transport en site propre automatisée sont inclus dans le modèle de transport ce qui influence probablement ces résultats.

Correspondances avec la base de données ecoinvent v3

La base de données ecoinvent v3 donne, pour trois catégories de normes (EURO 3, 4 ou 5) et trois tailles de véhicules particuliers (petit, moyen, grand), l'inventaire d'impact par unité de distance parcourue (km).

La correspondance entre le modèle de transport et la base de données se fait en quatre temps :

- À l'horizon 2030, le modèle de transport considère un mix de 92 % de diesel et de 8 % de véhicules essence (hypothèse fixée¹¹⁰). Cette répartition affecte les émissions directes hors CO₂, NO_x et PM (COV, métaux lourds), la chaîne pétrolière associée au carburant ainsi que la fabrication des véhicules (deux inventaires distincts dans la base de données ecoinvent v3).
- La répartition en catégorie de taille des véhicules est ensuite faite à partir de la répartition prévue du parc roulant en 2025 (Annexe P, Hugrel et Joumard, 2004, p. 25). Une proportion de 60 % de véhicules de petite taille et de 40 % de véhicules de grande taille est retenue. Cette répartition permet de déterminer la part de la fabrication et de la maintenance des véhicules. Le poids du véhicule moyen est estimé à 1,52 t, soit 0,10 kg de véhicule par km et $8,6 \cdot 10^{-6}$ unité de maintenance par km (voir également Chapitre 5, paragraphe 5.2.3.4).
- La consommation de carburant par km est ajustée aux sorties du modèle de transport. Cela entraîne une modification des émissions de CO₂, COV et métaux lourds contenus dans le carburant ainsi qu'une modification de l'impact de la chaîne pétrolière.
- Les émissions de NO_x et de particules fines sont enfin réajustées par rapport au modèle de transport.

À noter que les infrastructures routières incluses dans les frontières du système sont les infrastructures et voiries construites dans le cadre du projet de quartier et sont donc déjà intégrées dans la partie matériaux de construction. Elles ne sont donc pas incluses ici.

Le remplissage moyen des bus parcourant la zone du projet est de 7 passagers par bus, avec une variation de 5 à 8 selon les zones.

6.2.4. Analyse du cycle de vie

6.2.4.1. HYPOTHÈSES GÉNÉRALES

La base de données ecoinvent v3, version APOS est utilisée pour modéliser l'inventaire de production et l'inventaire de flux. Les approches attributionnelles et conséquentielle sont développées à partir de cette même base de données.

¹¹⁰ Cette hypothèse de répartition du parc automobile provient d'une étude de 2004 (Hugrel et Joumard, 2004). La répartition du parc actuel est de 70 % diesel et 30 % essence (voir Chapitre 5). Des études récentes prévoient plutôt une baisse qu'une hausse de la part des diesels par rapport au parc actuel, ainsi qu'un pourcentage non négligeable (plus de 10 %) de véhicules hybrides et électriques (SETRA, 2014, p. 51). La répartition du parc affecte de façon importante les courbes d'émissions et les résultats de l'analyse environnementale. La modification des caractéristiques du parc n'était pas possible dans le cadre de l'étude de cas.

Le choix du système de modélisation de la base de données (Cut-Off, APOS ou Conséquentiel long-terme) est discuté à la fin de ce chapitre (voir paragraphe 6.2.6).

Les douze indicateurs environnementaux présentés au Chapitre 1 sont évalués. Le Tableau 53 ci-dessous rappelle ces indicateurs et les méthodes de caractérisation qui leur sont associées.

Tableau 53 : Indicateurs environnementaux évalués dans l'étude de cas

Indicateur environnemental	Unité	Référence
Demande cumulative d'énergie	GJ [PCS]	(Frischknecht et al., 2007)
Eau utilisée	m ³	(Frischknecht et al., 2007)
Épuisement des ressources abiotiques	kg Sb éq.	(Jeroen Guinee, 2002)
Déchets produits	t	(Frischknecht et al., 2007)
Déchets radioactifs	dm ³	(Frischknecht et al., 2007)
Effet de serre (100 ans)	t CO ₂ éq.	(Solomon, 2007)
Acidification	kg SO ₂ éq.	(Jeroen Guinee, 2002)
Eutrophisation	kgPO ₄ ³⁻ éq.	(Jeroen Guinee, 2002)
Dommages à la biodiversité	PDF m ² an	(Goedkoop et Spriensma, 2001)
Dommages à la santé	DALY	(Goedkoop et Spriensma, 2001)
Production d'ozone photochimique	kg C ₂ H ₄ éq.	(Jeroen Guinee, 2002)
Odeur	m ³ air	(Jeroen Guinee, 2002)

6.2.4.2. HYPOTHÈSES SUR LES MATÉRIAUX

Procédés de fabrication des matériaux

Les correspondances entre les principaux matériaux de construction du quartier et les procédés de la base de données ecoinvent v3 qui les représentent sont données dans le Tableau 54.

Tableau 54 : Tableau des correspondances

Matériaux de construction	Quantité	Unité	Correspondance ecoinvent v3
Béton	78654	tonnes	<i>Concrete production, normal, FR*</i>
Armatures en acier	2360	tonnes	<i>Steel production, converter, unalloyed, RER</i>
Isolant, laine de verre	169	tonnes	<i>Glass wool production, RER</i>
Fenêtres doubles vitrages (m²)	10210	m ²	<i>10,4 kg polyvinylchloride, at regional storage 15 kg flat glass, coated, at plant 1,98 kg steel, converter, low-alloyed, at plant</i>
Plaque de Plâtre	1234	tonnes	<i>gypsum plasterboard production, RER</i>

* Le procédé de base est suisse. Le mix électrique est contextualisé pour correspondre à la France (mix marginal constant)

Les marchés de production de matières recyclées sont supposés contraints par la quantité de matière à recycler. Une augmentation de la consommation de matériaux est donc satisfaite par une augmentation de la production des filières primaires. Un certain nombre d'éléments (plomberie, électricité, etc.) sont supposés identiques entre les différentes variantes et ne sont pas pris en compte dans l'étude.

Fin de vie et taux de recyclage

Les hypothèses pour la fin de vie et l'éventuel recyclage des matériaux sont présentées dans le Tableau 55.

Tableau 55 : Scénarios de fin de vie pour les matériaux

Matériaux de construction	Scénario de fin de vie	Sources
Béton	60 % déchet inerte, décharge type III 40 % remblai routier	FDES
Acier	59 % recyclé / 7 % réutilisé / 34 % décharge III	(Sansom et Meijer, 2002, p. 48)
Isolant, laine de verre	100 % décharge type II	ecoinvent
Fenêtres PVC doubles vitrages	5 % du verre collecté pour recyclage, reste envoyé en décharge inerte	FDES ¹¹¹
Plaque de plâtre	100 % décharge site d'enfouissement	ecoinvent

Les différentes approches méthodologiques divergent sur la prise en compte du recyclage, ce qui concerne notamment le traitement du béton et de l'acier :

- Approche attributionnelle, approche des stocks : le bénéfice du recyclage est comptabilisé lors de l'utilisation de matériaux recyclés. Les frontières du système s'arrêtent à la sortie du centre de tri pour les matériaux envoyés vers le recyclage.
- Approche conséquentielle : le bénéfice du recyclage est attribué en fonction des caractéristiques du marché affecté. La plupart du temps (e.g. métaux), seule la mise à disposition de matière recyclée peut permettre d'augmenter la production de matériaux recyclés. Le bénéfice du recyclage est alors entièrement alloué à la mise à disposition de matière à recycler (en sortie du cycle de vie) et aucun bénéfice n'est associé à l'utilisation de matériaux recyclés. L'hypothèse sous-jacente est que cette situation perdure jusqu'à la fin de vie des bâtiments, ce qui est hautement incertain. Une étude de sensibilité pour la fin de vie de l'acier, selon le contexte, est proposée au paragraphe 6.2.7.

La différence entre l'approche des stocks, ou approche du contenu recyclé et l'approche des impacts évités est illustrée à la Figure 149, extraite des travaux de

¹¹¹ Fenêtres et portes fenêtres en PVC teinté dans la masse ou plaxé, à double vitrage. Le plaxage consiste à coller à chaud un film décor en PVC d'une épaisseur de 20 µm sur un profilé PVC (http://www.fenetrierveka.fr/dico_fenestres_pvc.html).

Gomes et al. (2013) sur le cas du recyclage de l'acier utilisé dans le secteur de la construction.

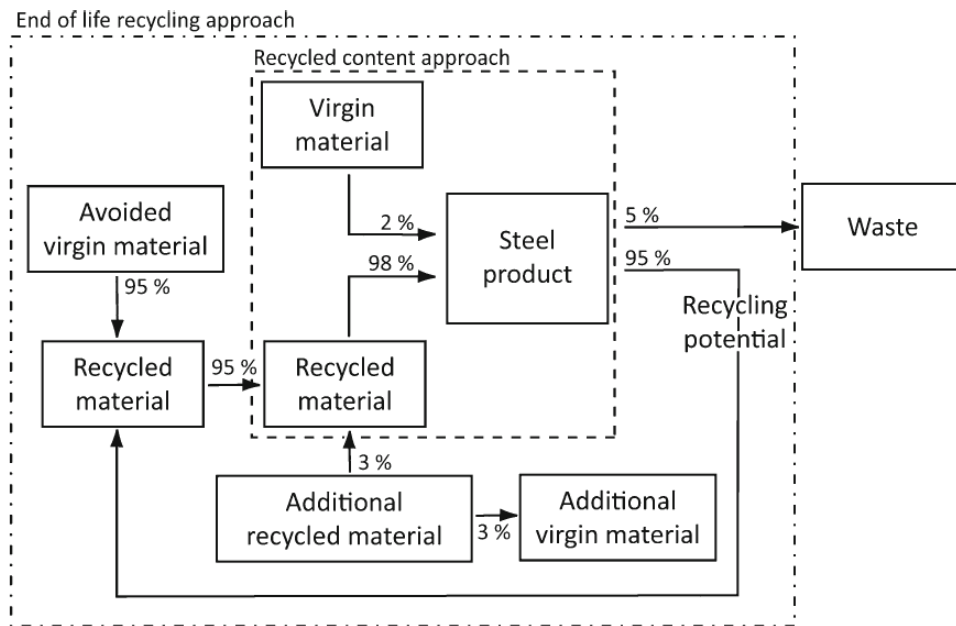


Figure 149 : Approches ACVA (recycled content approach ou cut-off) et approche ACVC (end of life recycling ou system expansion), extrait de Gomes et al. (2013)

Durée de vie

Le quartier est évalué sur une durée de 100 ans. On considère une durée de vie des matériaux de structure égale à 100 ans, une durée de vie des revêtements de 10 ans, 30 ans pour les portes et fenêtres, 25 ans pour les équipements (équipements de chauffage, de ventilation, de climatisation, panneaux photovoltaïques).

Autres hypothèses

Les hypothèses proposées par défaut dans le logiciel novaEQUER sont utilisées pour modéliser les impacts liés au chantier (surplus de matériaux de 5 %) et au transport des matériaux (distance de transport des matériaux de 100 km en moyenne, par camion effectuant un retour à vide, distance site-décharge de 20 km, distance site-centre de recyclage : 100 km).

6.2.4.3. HYPOTHÈSES SUR L'UTILISATION DES BÂTIMENTS

Hypothèses sur les systèmes de production d'énergie

Les besoins en énergie pour le quartier concernent : le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la climatisation, la ventilation, l'éclairage ainsi que la consommation d'électricité spécifique des appareils électriques et électroniques.

L'électricité spécifique est également comptabilisée en partie comme apports internes dans l'étude thermique.

Les pertes en ligne pour la consommation d'électricité importée sur réseau sont estimées à 9 %. Une évaluation horaire du mix marginal ou du mix moyen est effectuée pour déterminer la production d'électricité à associer au projet.

La part d'électricité spécifique couverte par le système photovoltaïque est considérée comme une production évitée du réseau électrique. La part d'électricité exportée vers le réseau est évaluée comme une production évitée du réseau électrique : 6 % de perte en ligne sont considérées entre l'export vers le réseau et la consommation par un autre utilisateur du réseau. Ce niveau de perte en ligne correspond au niveau de perte moyen national sur le réseau basse tension. Pour les variantes avec PV (BBC et PAS), la part d'électricité produite localement et autoconsommée s'élève à 91 % pour les deux variantes.

Hypothèses sur la prise en compte de la consommation d'eau

On considère que les occupants des logements consomment 132 L d'eau potable par jour (48 m³ par an), contre 30 pour les employés des bureaux et 9 pour les employés des commerces (Mailhac, 2015). Cette eau consommée est ensuite envoyée vers le réseau de traitement des eaux usées.

Concernant les logements, un procédé de traitement des eaux usées par personne et par an, indépendant de la consommation d'eau, est utilisé afin de tenir compte de la possibilité de diminuer la consommation d'eau (économiseur d'eau, récupération d'eau de pluie) à charge polluante équivalente. Cette hypothèse ne peut être utilisée pour les bureaux et les commerces qui consomment beaucoup moins d'eau que les logements, à charge polluante équivalente. On considère donc un « équivalent-habitant-logement » pour le traitement des eaux usées, correspondant à 0,23 pour les bureaux et 0,07 pour les commerces¹¹².

En région Île-de-France (IDF), 75 % de l'eau du réseau d'eau potable provient de rivières, où l'eau est rejetée après traitement dans les stations d'épuration. Seule 25 % de l'eau provient de nappes souterraines¹¹³. Pour l'évaluation de l'indicateur de consommation d'eau, portant sur l'accapuration de la ressource, l'ensemble de l'eau provenant des nappes est considéré ainsi que 10 % de l'eau de rivière. Ce prélèvement d'eau effectif de 10 % est fixé arbitrairement pour tenir compte de pertes et d'évaporation pour le réseau d'eaux usées. Le rendement du réseau d'eau potable est fixé à 80 %.

¹¹² Ces équivalences sont calculées à partir des données de consommation d'eau annuelle dans un bâtiment résidentiel (48 m³.hab⁻¹.an⁻¹), dans un bâtiment de bureau (11 m³.employé⁻¹.an⁻¹) et dans un bâtiment commercial (3,2 m³.hab⁻¹.an⁻¹) du rapport Efficacity (Mailhac, 2015)

¹¹³ Source : <http://www.bnpe.eaufrance.fr/acces-donnees/>

6.2.4.4. HYPOTHÈSES SUR LE TRAITEMENT DES DÉCHETS

La quantité annuelle de déchets pour les différents usages du quartier a été estimée par l'institut *Efficacity* (Grimaud, 2015). Les quantités finales de déchets par catégorie et les filières de traitement associées sont présentées dans le Tableau 56. Plus de détails sont disponibles en Annexe Q. Les procédés de la base de données ecoinvent considérés pour chaque filière et chaque type de déchet sont présentés dans le Tableau 57.

La région IDF est particulière pour le traitement des déchets ménagers. Il y a beaucoup plus d'incinérateurs que dans les autres régions de France et la proximité des centres de recyclage est plus grande à cause de la forte densité de population. Il est donc nécessaire de contextualiser la gestion des déchets ménagers avant de déterminer les impacts qui pourront être associés à la construction d'un quartier supplémentaire dans cette région.

Selon les informations de l'ORDIF¹¹⁴, 75 % des ordures ménagères sont incinérés en IDF. Pour la Cité Descartes, l'étude réalisée par *Efficacity* (Grimaud, 2015) prévoit l'incinération de 53,5 % des déchets (hors encombrants et apports en déchetterie).

Les encombrants et les apports en déchetterie ont été négligés dans cette étude car ils sont très difficiles à caractériser (matières). La composition des ordures ménagères est estimée à partir de l'enquête MODECOM de caractérisation des ordures ménagères effectuée par l'ADEME (2007). Un refus de tri de 14 % est pris en compte¹¹⁵.

Tableau 56 : Caractérisation des déchets générés annuellement par la Cité Descartes

	Quantité de déchets totale (t/an)	% incinéré avec valorisation	% recyclé	% composté ou consigne du verre	% décharge	PCI
Verre	63	53,6	39,8	0	6,6	0,1
Papier/cartons	471	19,5	69,7	0	11,6	17,9
Plastiques	97	53,6	29,2	0	6,7	34,1
Organiques	318	67,1	3,3	28,7	0,9	4,3
Métaux	21	76,5	20,1	0	3,4	0
Textiles	72	100	0	0	0	19,8
Autres	55	100	0	0	0	10

¹¹⁴ Observatoire Régional des déchets d'île de France, <http://www.ordif.com>

¹¹⁵ Calculé à partir du ratio matière entrante sur matière sortante au centre de tri : 15543 t entrantes pour 13354 t sortantes, voir (Grimaud, 2015, p. 14)

Tableau 57 : Procédés ecoinvent considérés

Procédé écoinvent v3	Incinération	Recyclage/valorisation	Impact évité Recyclage	Décharge
Verre	<i>treatment of waste glass, municipal incineration</i>	<i>packaging glass production, green</i>	<i>packaging glass production, white, without cullet</i>	<i>treatment of inert waste, sanitary landfill</i>
Papier/cartons	<i>treatment of waste packaging paper, municipal incineration</i>	<i>paper production, newsprint, recycled</i>	<i>paper production, newsprint, virgin</i>	<i>treatment of waste paperboard, sanitary landfill</i>
Plastiques	<i>treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration</i>	<i>polystyrene foam slab production, 100% recycled</i>	<i>polystyrene foam slab production, 10% recycled</i>	<i>treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill</i>
Organiques	<i>treatment of biowaste, municipal incineration</i>	<i>treatment of biowaste, composting</i>	<i>market for compost</i>	<i>treatment of municipal solid waste, sanitary landfill</i>
Métaux¹¹⁶	<i>treatment of scrap steel, municipal incineration</i>	<i>steel production, electric, low-alloyed</i>	<i>steel production, converter, low-alloyed</i>	<i>treatment of waste aluminium, sanitary landfill¹¹⁷</i>
Textiles	<i>treatment of waste textile, soiled, municipal incineration</i>	-	-	<i>treatment of municipal solid waste, sanitary landfill</i>
Autres	<i>treatment of municipal solid waste, incineration</i>	-	-	<i>treatment of municipal solid waste, sanitary landfill</i>

L'incinérateur le plus proche se situe à Saint-Thibault-des-Vignes, à une distance d'environ 12 km du projet. Cependant, cet incinérateur fonctionne aujourd'hui à sa limite de capacité. Une quantité supplémentaire de déchets ne pourra donc pas être traitée par ce site et les déchets devront être expédiés plus loin, jusqu'à l'incinérateur d'Ivry-sur-Seine qui conserve une capacité de traitement. Cet incinérateur, produisant à la fois de la chaleur et de l'électricité, est lié au réseau de chaleur urbain de la CPCU (Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain).

En prenant une hypothèse de PCI moyen des déchets de 10 MJ/kg, le rendement électrique de l'incinérateur peut être évalué à 3,2 % et le rendement thermique à 50,0 %, soit une efficacité globale de 53,2 %. Les incinérateurs ont souvent des rendements énergétiques plus bas que les chaufferies car ils doivent être dimensionnés pour accepter des déchets très variés (p. ex. humidité et PCI variables). Les déchets ultimes sont stockés à Claye-Souilly. Le centre de tri se situe à Chelles.

¹¹⁶ L'acier est utilisé comme proxy pour les métaux car d'après (Grimaud, 2015, p. 14), la quantité d'acier valorisée est plus grande que la quantité d'aluminium valorisée.

¹¹⁷ En l'absence de procédé de mise en décharge II pour l'acier, l'aluminium est utilisé comme proxy.

6.2.4.5. HYPOTHÈSES SUR LES ESPACES PUBLICS

Les caractéristiques par défaut des espaces publics et des voiries du logiciel novaEQUER sont considérées dans cette étude ; elles sont rappelées dans le Tableau 58. La surface concernée dans le projet est rappelée dans la dernière ligne du Tableau.

Tableau 58 : Caractéristiques des espaces verts dans NovaEQUER

	Rues	Trottoirs	Espaces verts
Composition	5 cm béton bitumineux 10 cm gravier/béton (ajout de 2 cm tous les 30 ans)	5 cm de béton	-
Imperméabilité	90 %	60 %	40 %
Entretien	-	-	5 tontes /an
Éclairage	Sodium, 4,8 kWh.m ⁻² .an ⁻¹	-	-
Déchets	-	-	-
Eau	6 L/m ² /an		60 L/m ² /an
Durée de vie	100 ans Surplus matériaux de 10 %	100 ans Surplus matériaux de 10 %	
Surface concernée dans le projet (m²)	9804	4435	9546

L'extension des réseaux d'eau potable et d'eaux usées est prise en compte. Une longueur de réseau équivalente à la longueur de voirie est considérée, soit 730 m.

6.2.5. Résultats

6.2.5.1. ANALYSE DE CONTRIBUTION, VARIANTE RÉGLEMENTAIRE

L'analyse de contribution de la variante réglementaire (BBC) pour le projet de quartier est présentée dans la Figure 150. La méthodologie conséquentielle projet ACVC-P a été utilisée. Elle induit notamment les hypothèses suivantes :

- Pour la contribution des déchets ménagers, les impacts générés par la production de matière qui devient du déchet ménager sont exclus des frontières du système. Cette hypothèse est valable si le comportement des habitants n'est pas affecté par les variantes étudiées.¹¹⁸
- Pour les transports quotidiens, seuls les impacts des véhicules particuliers sont inclus. L'augmentation des impacts des transports en commun

¹¹⁸ Si l'on considère des impacts évités (donc négatifs) liés au recyclage, par exemple des emballages, sans prendre en compte la fabrication initiale de ces emballages, on peut obtenir des résultats paradoxaux où le bilan s'améliore quand la quantité de déchets augmente.

générée par les usagers du quartier est supposée négligeable. Cette hypothèse est valable si les décisions ne concernent pas des aménagements spécifiques concernant les transports en commun (par exemple : ajout d'un arrêt de bus).

- Les matériaux de construction produits en France dont le mix électrique est contextualisé sont contextualisés en utilisant le mix marginal constant donné par le modèle de simulation du système électrique (37 % de nucléaire, 62 % charbon et gaz, 1 % fioul et importations).

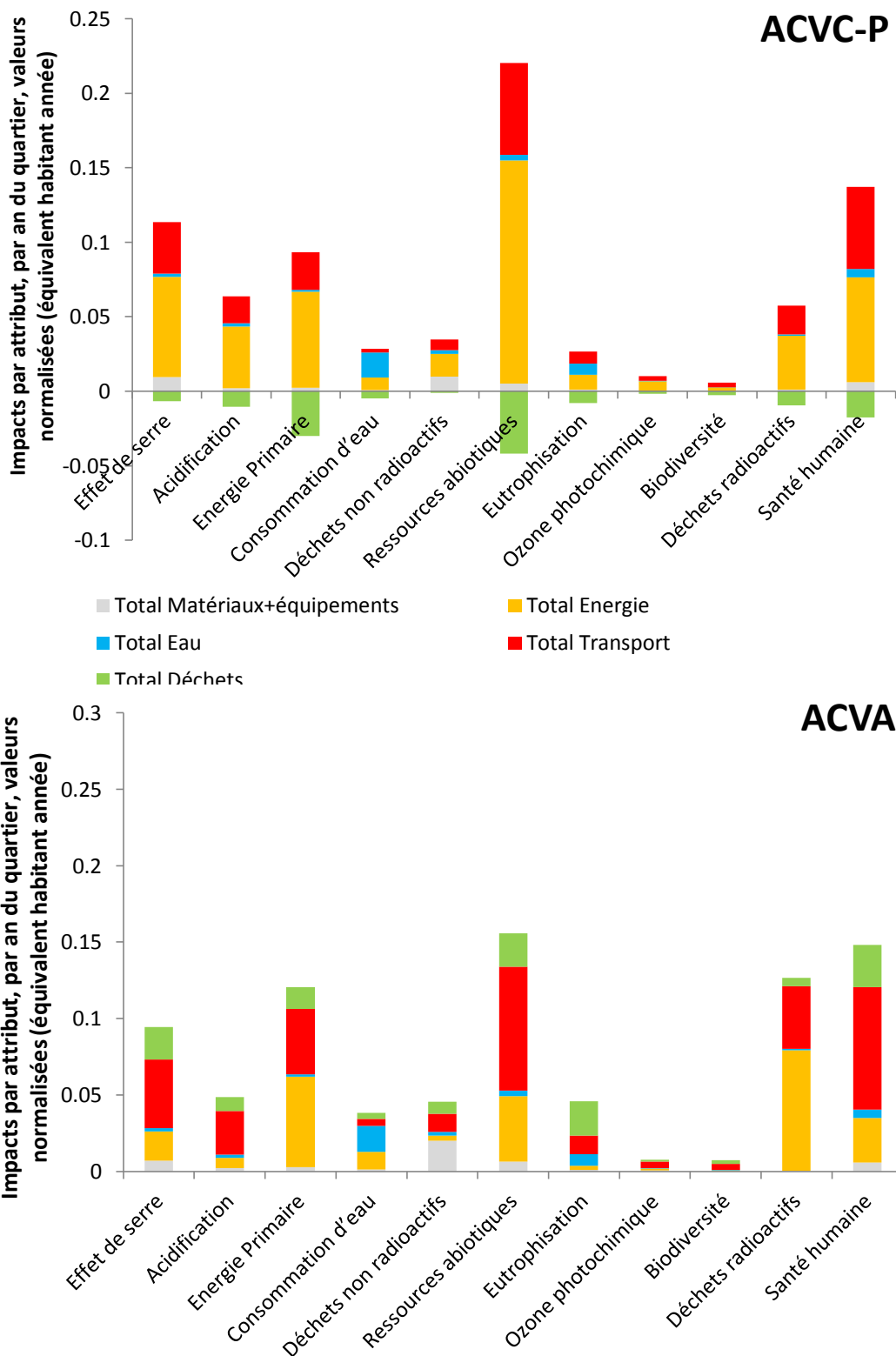


Figure 150 : Analyse de contribution à l'échelle du quartier, impacts normalisés, exprimés par attribut (usager du quartier) par an en ACVC-P (haut) ou ACVA (bas)

En ACVC-P, les transports quotidiens et l'énergie dominent pour de nombreux indicateurs. Toutefois, chaque contributeur peut être considéré comme non négligeable sur au moins un indicateur. Ce résultat illustre l'importance d'une collaboration étroite entre les différents experts métiers impliqués, en amont des projets de conception.

La part dominante des transports incite à privilégier un zonage du plan masse optimisé par rapport à l'accès aux transports en commun. Elle souligne également l'importance de l'urbanisation de zones bien desservies par les transports en commun par rapport au développement d'« éco-quartiers » éloignés des lignes de transport et favorisant l'utilisation des véhicules particuliers.

En ACVA, la part des transports augmente, ce qui est dû à la prise en compte des transports en commun (bus et transports électriques) et la part de l'énergie diminue (sauf sur l'indicateur d'énergie primaire et les déchets radioactifs) en conséquence de l'utilisation du mix moyen au lieu du mix marginal pour l'électricité. Les déchets ménagers prennent une part beaucoup plus importante dans l'ACVA à cause de la prise en compte de la production des matériaux devenant des déchets (verre, métaux, papier cartons, etc.). Le changement de modélisation des inventaires a peu d'impact sur la catégorie matériaux¹¹⁹. Une discussion concernant le choix de la base de données et du système de modélisation associé est proposé au paragraphe 6.2.6.

6.2.5.2. EFFET DU ZONAGE DU PLAN MASSE SUR LES TRANSPORTS QUOTIDIENS

Le programme actuellement prévu pour la cité Descartes comporte une faible mixité fonctionnelle par îlot : trois îlots sont principalement constitués de bureaux (sous-zones 12, 23 et 37 sur la Figure 147) alors que les quatre autres sont des bâtiments d'habitation (Figure 151, gauche).

L'institut de recherche *Efficacy* a réalisé une variante programmatique en considérant une mixité fonctionnelle identique pour chacun des îlots (Figure 151, droite), en conservant la surface totale prévue pour chaque type d'usage (logements et bureaux, les commerces étant moins nombreux et situés en rez-de-chaussée d'immeuble dans les deux cas). Le modèle de simulation des transports décrit au Chapitre 5 a été utilisé (simulation effectuée par *Efficacy*) pour évaluer les transports quotidiens par attribut pour cette nouvelle configuration.

¹¹⁹ Pour l'ACVA, la base ecoinvent v3 cutoff est utilisée avec une contextualisation utilisant le mix électrique annuel moyen.

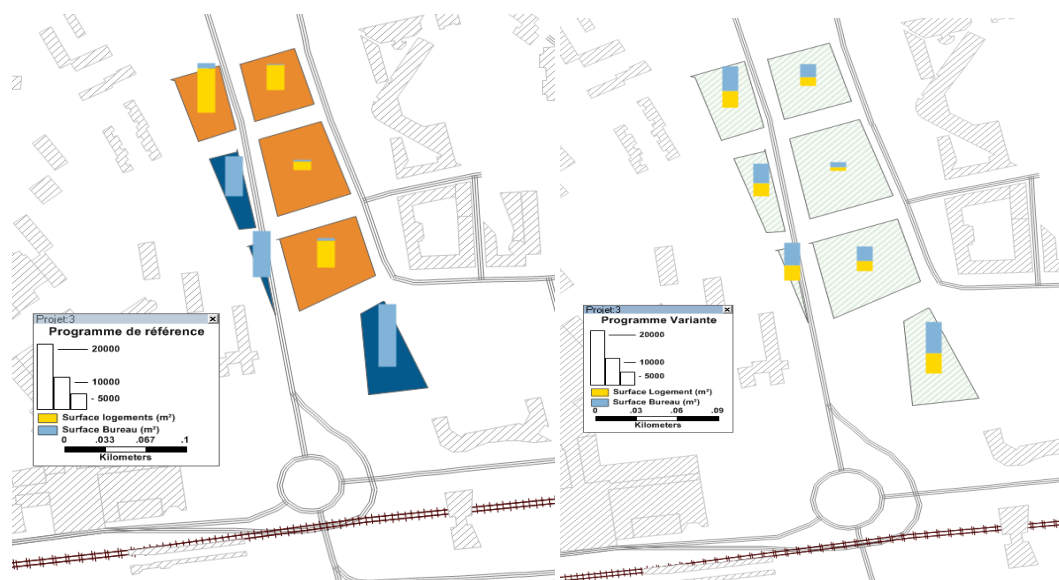


Figure 151 : Variante programmatique : mixité des îlots, programme de référence peu mixte (gauche) et variante mixte (droite), (figure fournie par l'institut de recherche Efficacity)

Le changement de variante programmatique a des conséquences sur les choix modaux (Figure 152). Une baisse des flux de modes doux (marche, vélo) est observée, ainsi qu'une légère baisse des flux de transports en commun et une légère hausse du nombre de flux de véhicules particuliers.

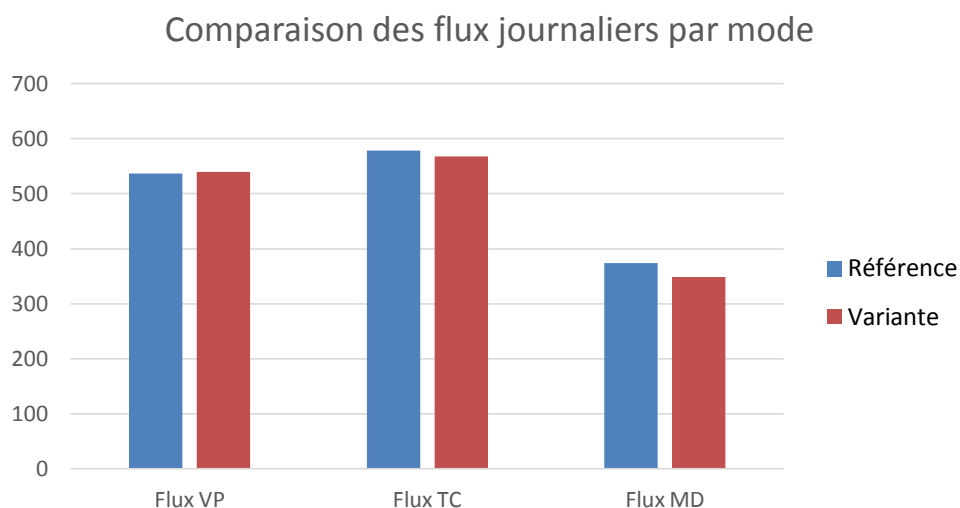


Figure 152 : Flux par mode pour le projet initial (Référence) et la variante (Variante) programmatique (figure fournie par l'institut de recherche Efficacity).

En matière de distance parcourue par les véhicules particuliers, les résultats sont présentés à la Figure 153.

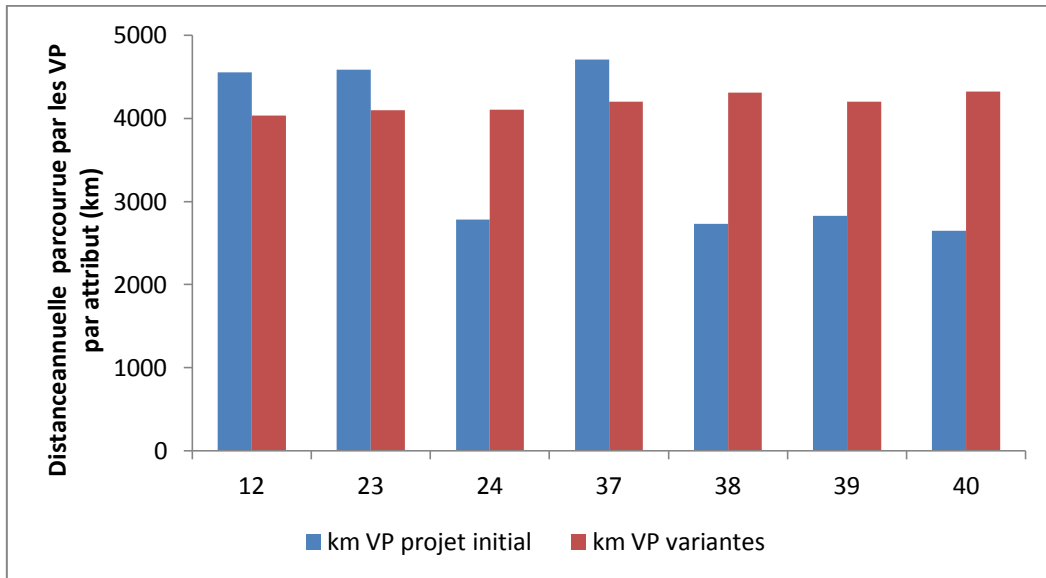


Figure 153 : Distance annuelle parcourue par les VP par attribut pour le projet initial et la variante grammaticale

L'augmentation finale de la distance annuelle parcourue en voiture est évaluée à 7 % par rapport au projet initial, ce qui conduit à dégrader d'autant le bilan environnemental des transports. Les bureaux génèrent un besoin de mobilité plus important que les logements (voir aussi Annexe R, Figure 201). Placer ces zones plus loin des transports en communs a donc entraîné une augmentation nette de la distance parcourue en voiture.

Le zonage des usages a également un impact sur les consommations d'énergies. Une simulation thermique dynamique du projet mixte a été réalisée, en plaçant des logements dans les étages supérieurs des bâtiments de bureaux et en intégrant des zones de bureaux dans les premiers étages des bâtiments résidentiels. Les résultats montrent une stabilité des besoins de chauffage globaux du quartier. Ceux-ci diminuent de 1,6 % grâce à une meilleure exposition des logements (étages supérieurs, bâtiments Sud). Le zonage mixte a par ailleurs une influence non négligeable sur les besoins de climatisation, qui baisse de 8,8 %, en lien avec des apports solaires plus faibles pour les bureaux, situés dans les étages inférieurs, moins exposés.

La variation de l'évaluation environnementale du projet engendrée par le changement de zonage, en tenant compte des changements sur les transports et de la performance énergétique est présentée à la Figure 154. L'augmentation des transports prime sur l'amélioration de la performance environnementale des bâtiments.

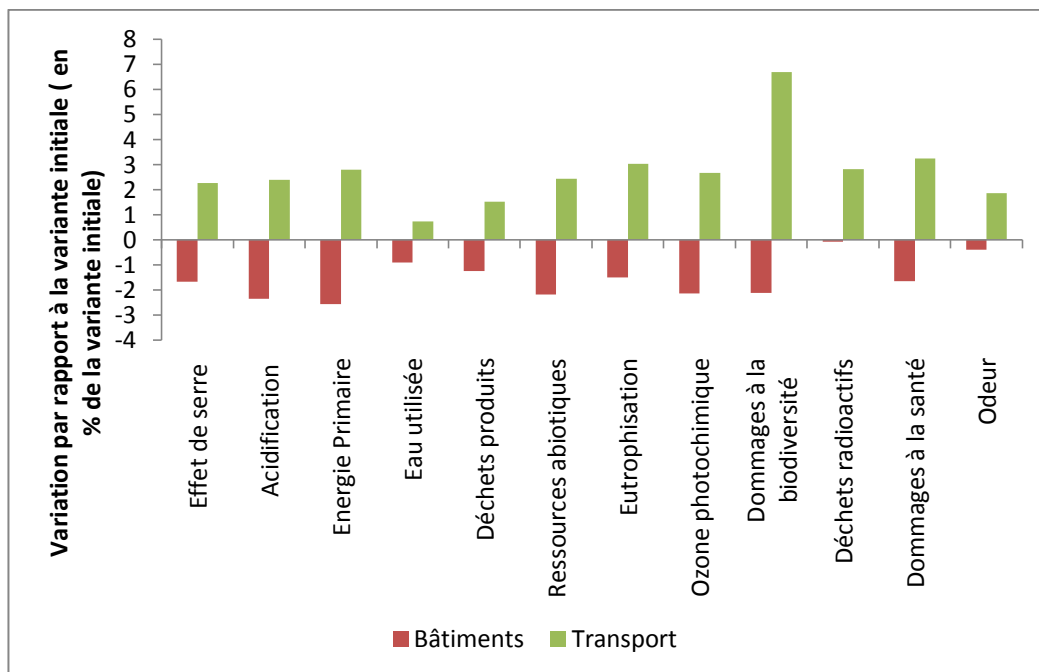


Figure 154 : Effet du zonage mixte sur les performances environnementales du projet

Cet exercice montre que le zonage du plan masse influence la mobilité des usagers du quartier. Lors de la planification du plan masse, les effets du zonage sur la performance énergétique des bâtiments (effets de masque, exposition des bâtiments selon leurs apports internes, etc.) et les effets sur le transport doivent être étudiés de manière conjointe pour optimiser le bilan environnemental global du projet.

6.2.5.3. FOCUS SUR LE TRAITEMENT DES DÉCHETS

L'analyse de contribution « déchets » par type de déchets est présentée sur la Figure 155. Les catégories des plastiques et des papiers/cartons dominent l'ensemble des indicateurs évalués. Dans ce quartier à usage mixte, avec une forte proportion de bureaux et de commerces, les papiers/cartons représentent plus de la moitié des tonnages collectés (52 %). On fait l'hypothèse que la génération d'énergie permet d'éviter l'utilisation de gaz naturel (indicateur d'énergie primaire et d'épuisement des ressources abiotiques négatif).

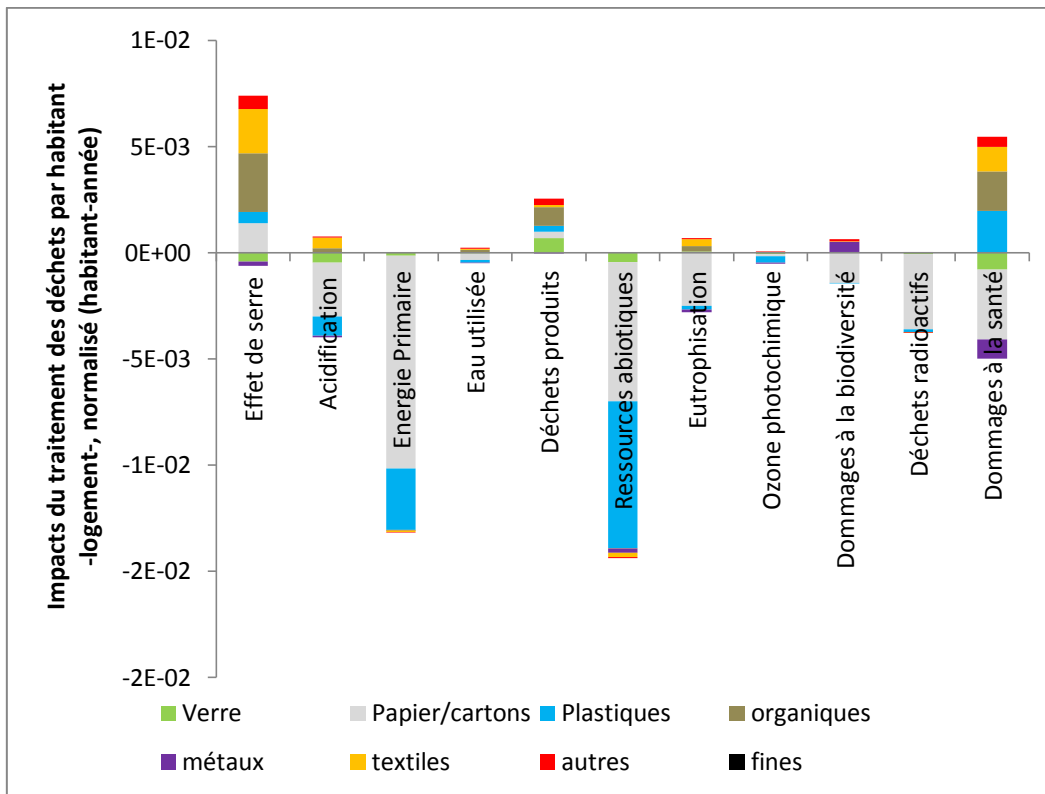


Figure 155 : Analyse de contribution du traitement des déchets, par type de déchets, impacts normalisés

L'indicateur de déchets inertes renseigne sur le potentiel d'amélioration de ce bilan : une part importante de cet indicateur est constituée des déchets de verre, qui peuvent être recyclés. Le bilan du verre sur les autres indicateurs montre l'intérêt environnemental de ce recyclage (potentiel de réchauffement global, par exemple). Les déchets organiques peuvent être valorisés (méthanisation ou compostage par exemple).

La Figure 156 présente plus en détail le cas des plastiques. Le recyclage concerne du polystyrène provenant des bureaux et des commerces. Malgré le fort pouvoir calorifique de ce type de déchets, le bilan de l'incinération est très mitigé alors que celui du recyclage est très favorable. Les résultats font écho à ceux présentés dans le Chapitre 5 (voir également l'Annexe O). L'indicateur de toxicité humaine serait plus bas dans un contexte où l'utilisation de fioul serait évitée (voir page 330).

L'impact de la fabrication des plastiques est représenté en blanc sur la Figure 156. Le mix de plastique considéré correspond aux principaux plastiques utilisés en Europe aujourd'hui, selon les données de Plastic Europe pour 2015¹²⁰. Les

¹²⁰ <http://www.plasticseurope.fr/industrie-du-plastique/donnees-du-marche.aspx>. Le mix estimé est constitué de 8,7 % de PET, 8,7 % de PS, 9,3 % de PUR, 12,8 % de PVC, 15,1 % de PE faible densité, 21,4 % de PE haute densité et 23,9 % de PP.

impacts de la production de la matière sont grands devant les impacts du traitement en fin de vie. Il est donc important d'intégrer la production de la matière première si la quantité de déchets générée (avant traitement et collecte) n'est pas équivalente dans toutes les variantes. Sinon le traitement des déchets peut produire un bilan positif lorsque la quantité de déchets augmente. Ici, la quantité de déchets pour chaque type de déchet est fixée.

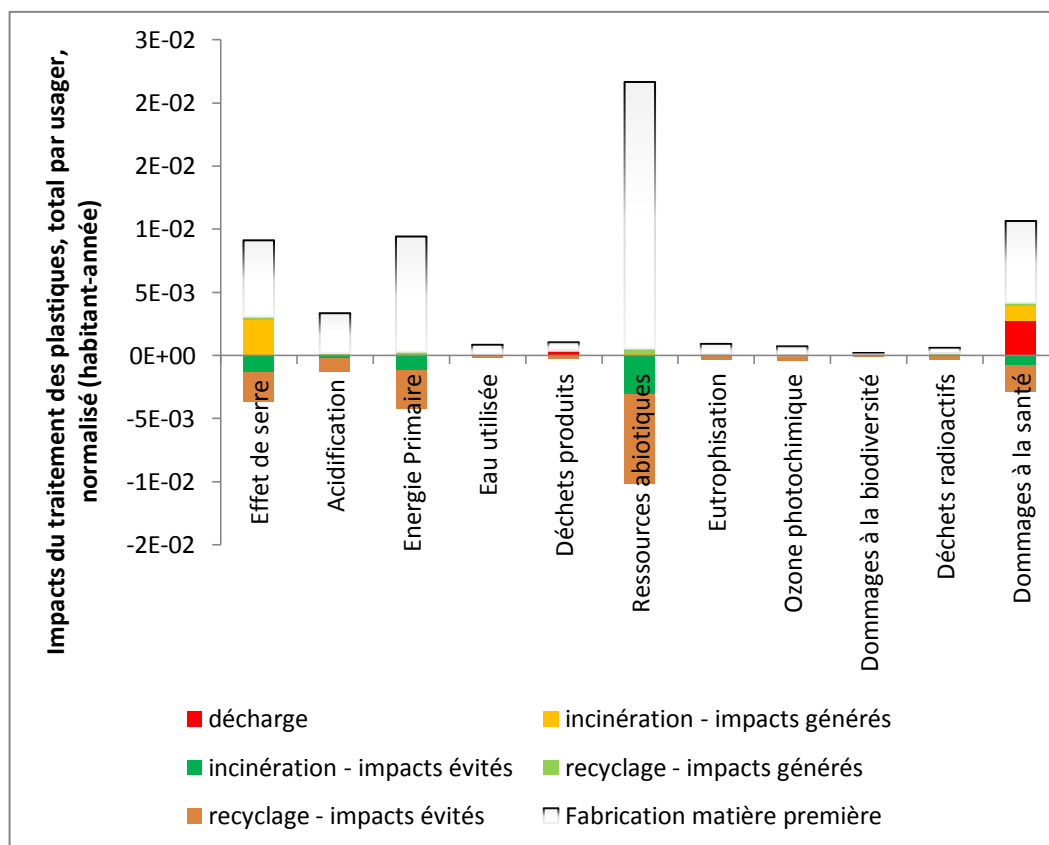


Figure 156 : Impact du traitement des plastiques, Analyse de contribution selon les types de traitement

Ce résultat souligne l'importance de la réduction du volume de ces déchets en amont et l'importance de la mise en place d'une filière de recyclage¹²¹. Cependant, celle-ci ne pourra être développée que lorsque les types de plastiques utilisés seront homogénéisés.

6.2.5.4. CHOIX DE L'ENVELOPPE ET PROSPECTIVE ÉNERGÉTIQUE

La méthodologie prospective exposée dans le chapitre 5 est appliquée ici, selon l'approche conséquentielle-projet aux trois variantes de conception : BBC (variante de référence), BBC+PV et PAS+PV. Seuls les résultats concernant les

¹²¹ Les plastiques recyclés proviennent de polystyrène recyclé en plaque de polystyrène.

matériaux constituant l'enveloppe et la consommation énergétique sont présentés. Les variantes étant équivalentes au niveau de la mobilité quotidienne, du traitement des déchets et de la consommation d'eau, ces contributeurs ne sont pas représentés dans ce paragraphe.

La consommation d'électricité spécifique des appareils TIC et électroménagers (donc hors éclairage et ventilation) n'est pas une conséquence de la construction du bâtiment étudié et n'est donc pas incluse dans la comparaison des variantes de conception (voir Chapitre 1 et Chapitre 3). Seule la variation de la consommation liée aux équipements du bâtiment est considérée.

i. **Respect de l'unité fonctionnelle et calcul de la consommation future**

Les besoins de chauffage et de climatisation ont été évalués par simulation thermique dynamique pour la station de Trappes en considérant les données météorologiques RT2012 originales puis transformées pour correspondre aux moyennes mensuelles et aux écarts de température journaliers futurs prévus par les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 développés par le GIEC (voir Chapitre 4, paragraphe 4.2). Les résultats sont présentés à la Figure 157.

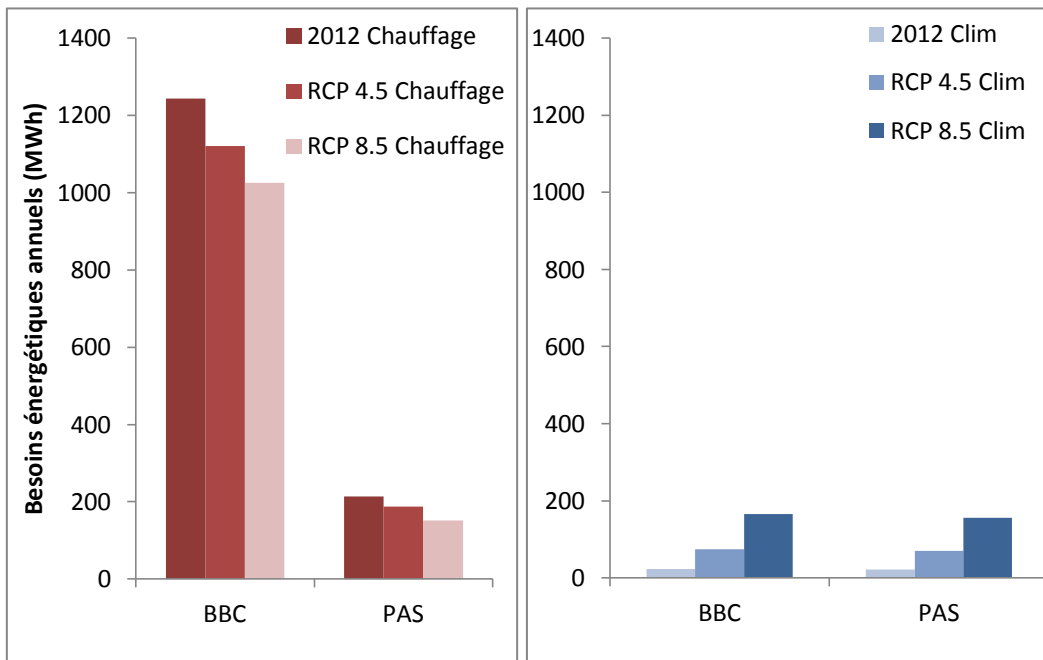


Figure 157 : Consommation d'énergie finale pour le chauffage (gauche) et la climatisation (droite) en fonction du scénario climatique : RT2012 (2012), RCP 4.5 ou RCP 8.5

Les besoins de chauffage baissent de 10 (RCP 4.5) à 19 % (RCP 8.5) pour la variante de référence (BBC) et de 12 (RCP 4.5) à 33 % (RCP 8.5) pour la variante passive (PAS). Les besoins de climatisation sont multipliés respectivement par 3 et 7 pour la variante BBC et par 2 et 6 pour la variante passive.

Une analyse des températures maximales observées dans les logements, non climatisés montre que le confort n'est pas substantiellement dégradé en conséquence du réchauffement climatique. Les températures maximales prévues restent inférieures à 30 °C grâce aux occultations et à la ventilation nocturne des bâtiments¹²². En conséquence, dans la suite de l'étude, aucun équipement de climatisation n'est considéré à moyen ou long terme dans les logements.

Les données de température utilisées sont issues d'une modélisation simplifiée pouvant notamment sous-estimer l'importance d'un phénomène d'îlot de chaleur urbain, qui se renforcerait avec le changement climatique. Ces résultats devront être confirmés en tenant en compte ce paramètre.

ii. **ACV présent**

Les hypothèses précédentes sont inchangées. Une quantité supplémentaire d'isolant et un enduit extérieur sont pris en compte pour la variante PAS+PV ainsi que la fabrication et le remplacement du système photovoltaïque (hypothèse d'une durée de vie de 25 ans) pour les variantes BBC+PV et PAS+PV.

La Figure 158 présente la comparaison des trois variantes BBC, BBC+PV et PAS+PV selon l'approche conséquentielle projet (ACVC-P). La variante PAS+PV est moins impactante que la variante BBC+PV pour ces indicateurs sauf pour les dommages à la santé humaine où les deux variantes sont équivalentes.

¹²² Pour l'îlot de logement le plus exposé (îlot 6, dernier étage R+8), le nombre d'heures où la température est supérieure à 27 °C passe de 435 heures (climat actuel) à 973 heures en RCP 8.5 pour la variante BBC. Seules 42 heures dépassent les 30 °C en RCP 8.5 et la température maximale simulée est de 31 °C. Pour la variante PAS+PV, le nombre d'heures où T > 27 °C passe de 904 à 1113 mais seules 22 heures dépassent 30 °C et la température maximale simulée est de 31°C également.

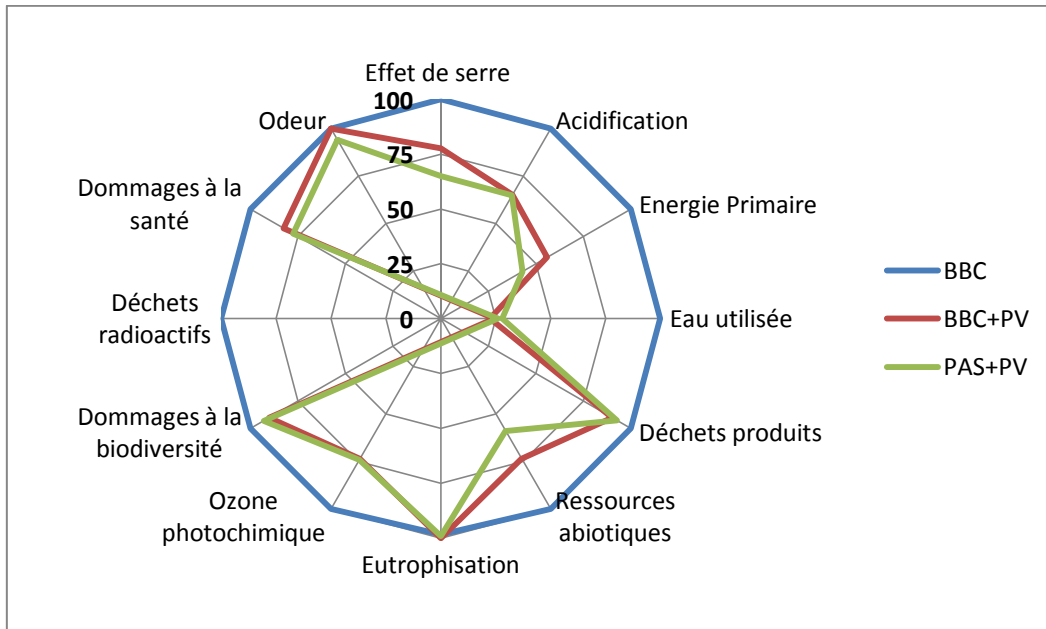


Figure 158 : Comparaison des variantes énergétiques, ACVC-P

L'utilisation de l'approche conséquentielle souligne l'intérêt de la mise en place de production renouvelable sur site dans un contexte où le mix électrique n'est pas à 100 % constitué d'électricité renouvelable : les deux variantes avec photovoltaïque (BBC+PV et PAS+PV) peuvent être globalement considérées comme moins impactantes que la variante de référence. Pour la plupart des indicateurs, l'énergie produite par le système solaire et la production évitée en conséquence supplante les impacts de sa fabrication (et remplacement).

La Figure 159 présente la comparaison des variantes en valeurs normalisées. Celle-ci confirme l'analyse de la figure précédente : les indicateurs comme l'eutrophisation, l'eau utilisée ou les dommages à la biodiversité, sur lesquelles le classement des variantes est mitigé, ont une part relative en équivalent habitants-années faible.¹²³ Les valeurs normalisées peuvent sembler faibles, mais elles ne représentent que la partie matériaux, équipement et énergie (hors électroménager et bureautique) sur un quartier comportant de nombreux bureaux et avec une performance énergétique meilleure que la moyenne du parc actuel.

¹²³ On rappelle que dans ces résultats, la part de consommation d'électricité spécifique liée aux équipements électriques et électroniques a été enlevée, ce qui explique que les résultats diffèrent de l'étude de contribution présentée plus haut (6.2.5.1).

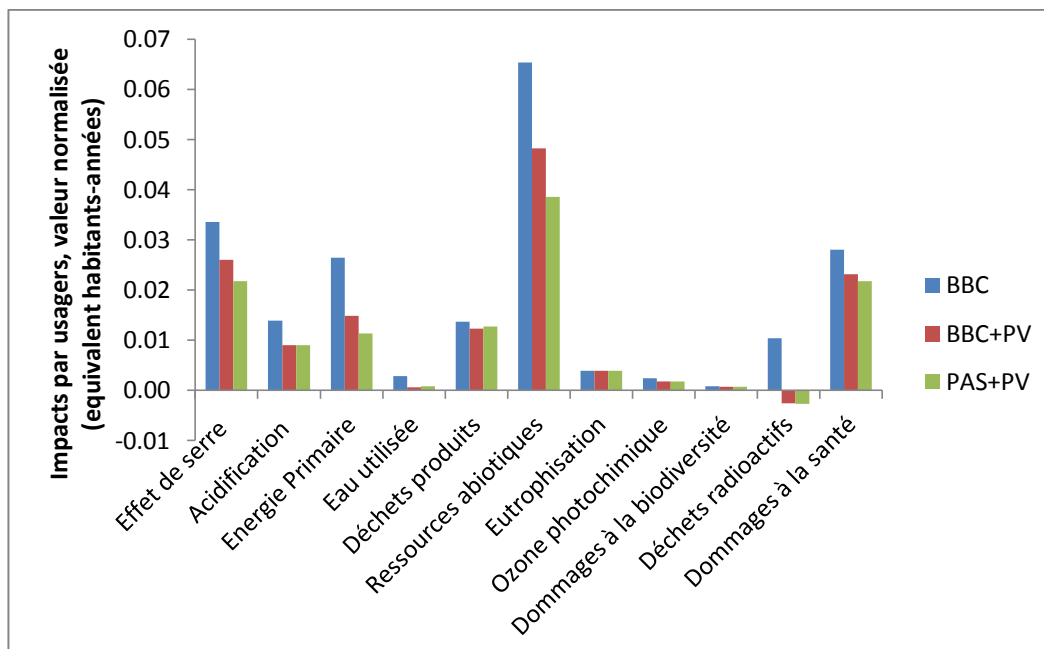


Figure 159 : Comparaison des variantes, valeurs normalisées, ACVC-P

La Figure 160 illustre le résultat obtenu en conservant une approche attributionnelle et donc en particulier en utilisant un mix moyen pour l'évaluation des impacts de l'électricité. Le classement des variantes est singulièrement différent. La variante passive (PAS+PV) est plus favorable que la variante BBC (BBC+PV). Cependant, entre les deux variantes BBC, le classement dépend fortement de l'indicateur considéré.

La production photovoltaïque permet de diminuer la consommation d'électricité, mais celle-ci est très peu impactante pour de nombreux indicateurs (sauf les indicateurs liés à la production nucléaire : déchets radioactifs, eau utilisée, énergie primaire). Sur de nombreux indicateurs (e.g. ressource abiotique, acidification, dommage à la santé), les impacts de la fabrication du système photovoltaïque sont évalués comme plus importants que les impacts évités grâce à la production d'énergie renouvelable.

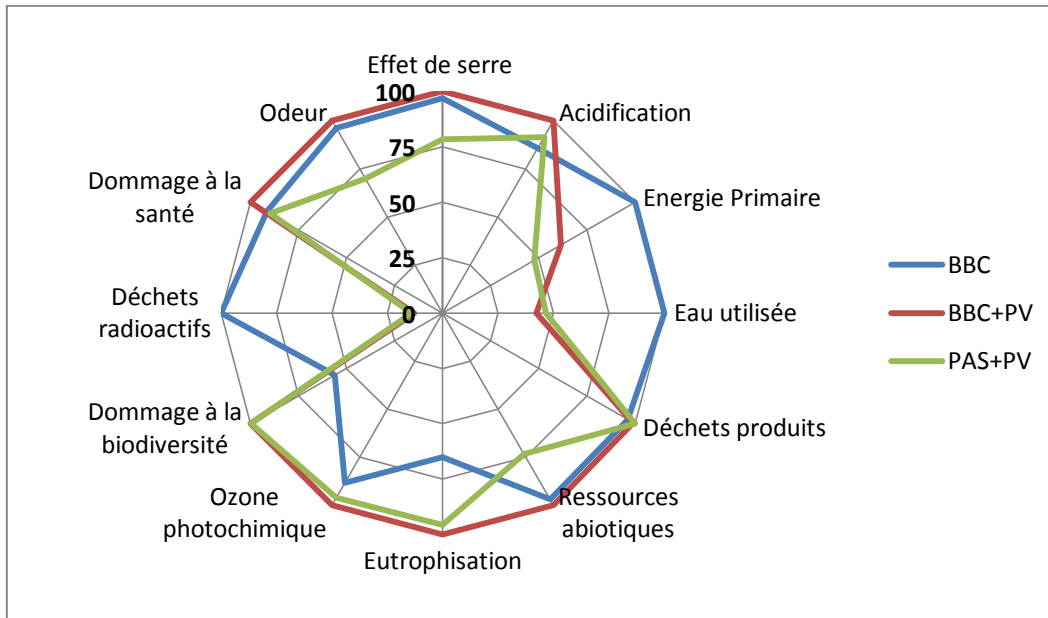


Figure 160 : Comparaison des variantes énergétiques, ACVA

L'utilisation d'une approche attributionnelle en conception peut conduire à favoriser la variante BBC par rapport à la variante BBC+PV alors que l'analyse conséquentielle, qui tient compte des contraintes de production existante montre que la production d'électricité sur site a un intérêt environnemental certain.

En valeur normalisée, les indicateurs dont la part relative par habitants-années est la plus importante en ACVA sont les ressources abiotiques, l'énergie primaire, l'effet de serre, les déchets produits, les dommages à la santé et les déchets radioactifs (Figure 161). Le classement entre BBC et BBC+PV est toujours fortement dépendant de l'indicateur, même en considérant seulement les six indicateurs dont la valeur normalisée est la plus haute.

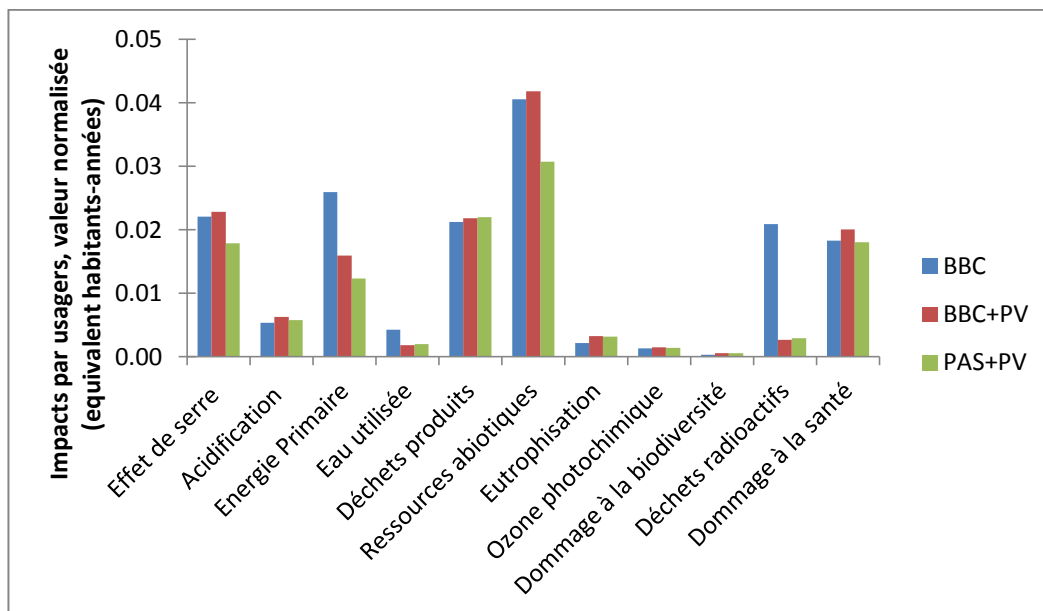


Figure 161 : Comparaison des variantes, ACVA, valeurs normalisées

Les deux approches s'accordent sur le meilleur classement de la variante passive par rapport à la variante BBC. Ce résultat est très sensible à la consommation considérée pour la ventilation et à l'évaluation des besoins de climatisation.

iii. ACVC-P future, utilisation de l'énergie

Le modèle MARKAL-TIMES présenté au Chapitre 4 est utilisé pour évaluer les impacts environnementaux de la consommation d'électricité par la méthode GHG-P présentée au Chapitre 3, paragraphe 3.4.2.

La réalisation du quartier est prévue pour 2030. Les impacts de la consommation d'énergie sont donc évalués à partir de cette date. La durée de validité des évaluations environnementales à 2030 et 2050 est fixée respectivement à 20 et 80 ans.

Les hypothèses principales des différents scénarios sont rappelées dans la Figure 162. La méthodologie est exposée en détail dans le Chapitre 4.

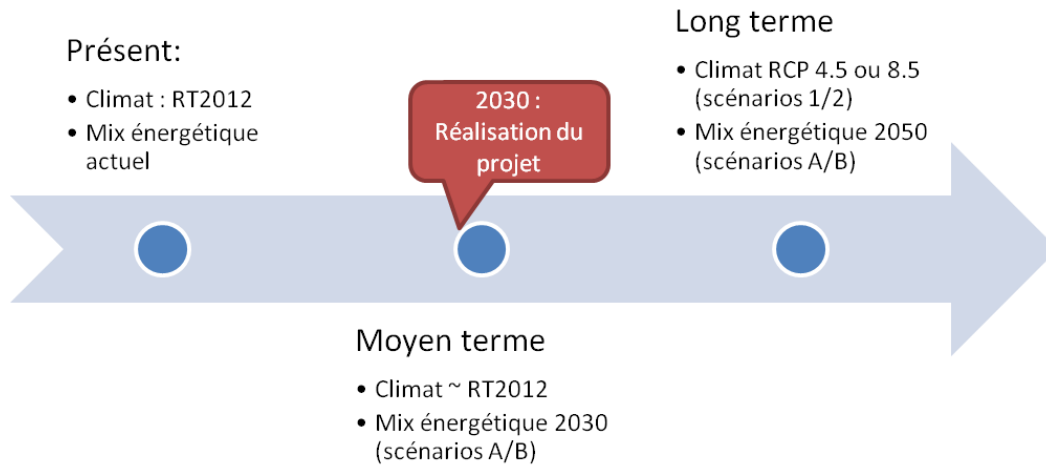


Figure 162 : Hypothèses générales pour l'étude prospective

iv. Synthèse

Les résultats de l'analyse prospective sont présentés à la Figure 163 pour les indicateurs d'effet de serre, de déchets radioactifs, de ressources abiotiques et de santé humaine. Les résultats sur l'ensemble des indicateurs sont proposés en Annexe T.

Le premier constat sur ces résultats est la prévalence des scénarios technologiques (A vs B) par rapport aux scénarios climatiques (1 vs 2). Les scénarios A (*Business as usual*) présentent généralement des valeurs plus élevées que les scénarios B (taxe carbone) sauf dans le cas des déchets radioactifs, la proportion de nucléaire dans le mix marginal à long terme étant plus importante dans le scénario B.

Les variantes de conception se classent différemment selon l'indicateur observé. La variante de référence BBC est généralement la moins bien classée ; les variantes avec production photovoltaïque sont proches et leur classement dépend de l'indicateur. L'économie de gaz de la variante PAS+PV par rapport à la variante BBC+PV (diminution des besoins de chauffage) est compensée pour certains indicateurs (e.g. déchets radioactifs) par une légère augmentation de la consommation d'électricité due à la ventilation double-flux¹²⁴.

Les résultats des variantes avec PV sont également moins sensibles aux scénarios, la part de l'électricité étant plus faible (consommation plus basse et exports).

¹²⁴ La consommation de ventilation est fixée à 0,1 Wh.m⁻³ par ventilateur.

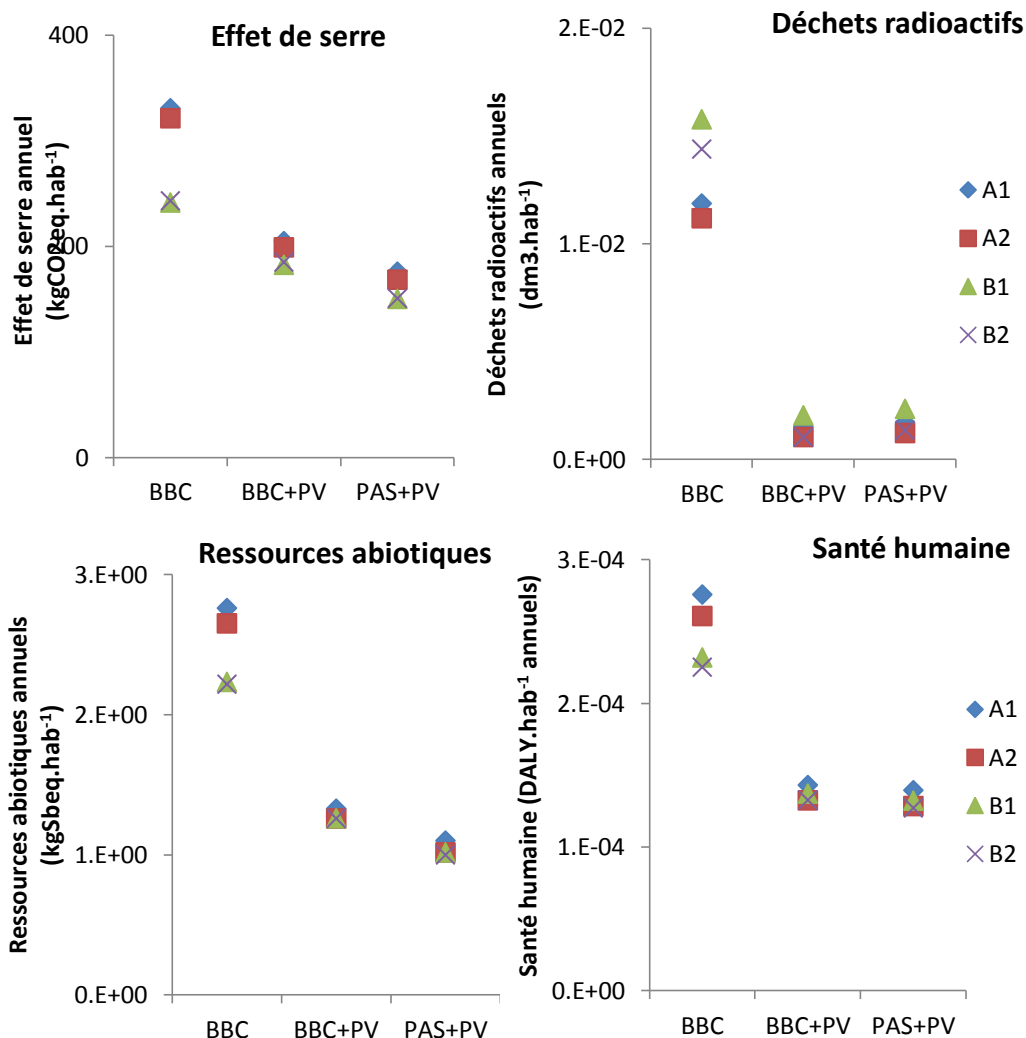


Figure 163 : Indicateurs d'effet de serre, de déchets radioactifs, de ressources abiotiques et de santé humaine, pour les quatre scénarios et les trois variantes de conception de l'enveloppe¹²⁵, ACVC-P

Ces mêmes résultats sont présentés sur la Figure 164 en utilisant l'approche attributionnelle. Tout comme dans le cas de l'ACV présent, la variante passive est généralement meilleure que la variante réglementaire (BBC+PV vs PAS+PV). Le bilan est plus mitigé pour la comparaison entre les deux variantes BBC (avec ou sans production locale d'énergie).

¹²⁵ À l'identique des résultats présentés dans le chapitre 4, les lettres des scénarios correspondent au scénario technologique (A : BAU – budget CO2 constant pour le système électrique et B : taxe carbone) et les numéros correspondent aux scénarios climatiques (1 : RCP 8.5, 2 : RCP 4.5)

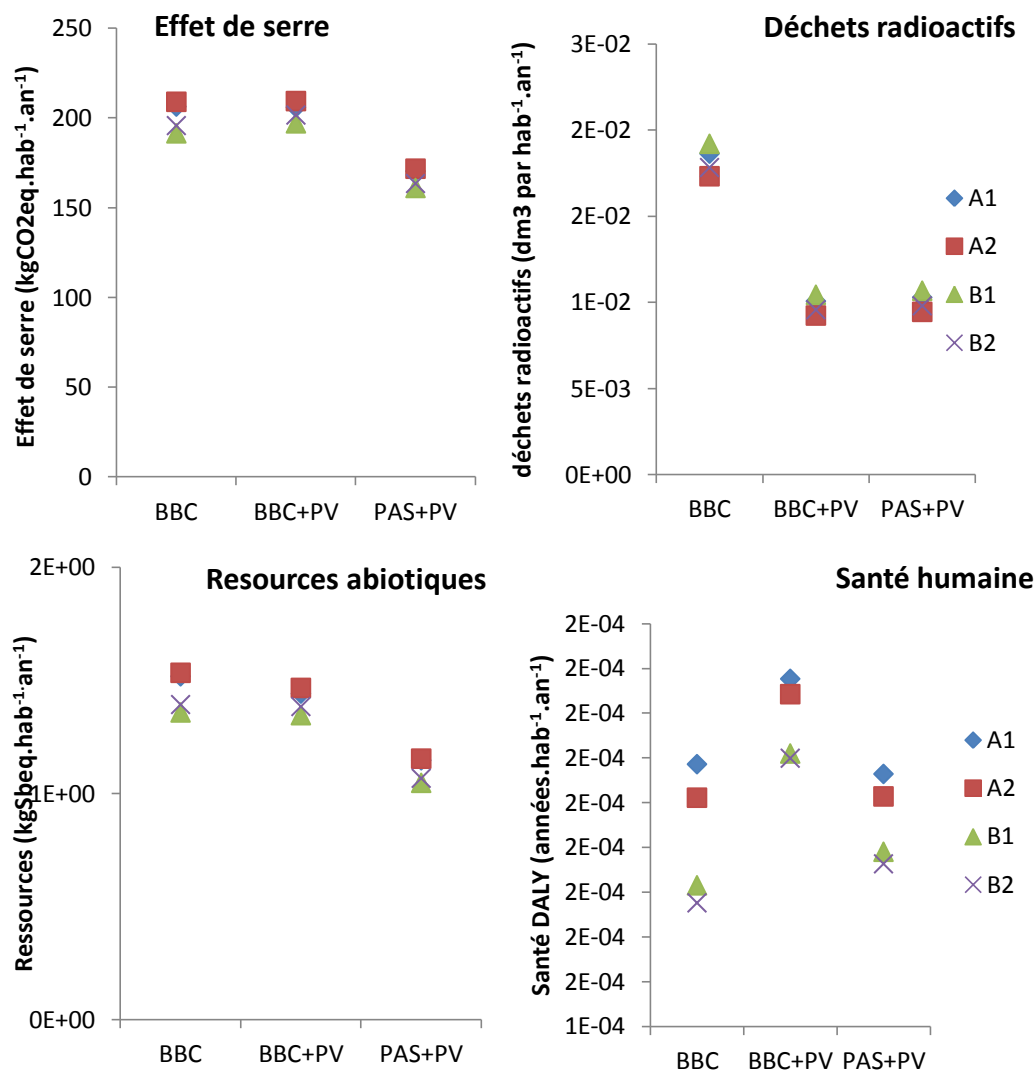


Figure 164 : Indicateurs d'effet de serre, de déchets radioactifs, de ressources abiotiques et de santé humaine, pour les quatre scénarios et les trois variantes de conception de l'enveloppe, ACVA

La principale différence entre les deux approches est la position de la variante intermédiaire BBC+PV. Elle a tendance à être favorisée dans l'approche ACVC-P dans laquelle l'utilisation de l'électricité est fortement pénalisée.

A *contrario*, elle présente moins d'intérêt dans l'approche attributionnelle, qui ne valorise pas l'export d'énergie (mais compte la fabrication du système PV au prorata de l'autoconsommation) et qui pénalise peu les consommations d'électricité engendrées par le projet en leur associant un mix moyen auquel contribue une part non négligeable d'énergie renouvelable (autour de 18 % à l'heure actuelle, dont 13 % d'hydraulique).

6.2.6. **Choix du système de modélisation de la base de données**

Trois systèmes de modélisation sont disponibles dans la base de données ecoinvent v3 : *cut-off*, *allocation at the point of substitution* (APOS) ou conséquentiel long terme (conseq). La base APOS a été choisie pour l'étude conséquentielle-projet. Pour les matériaux de construction produits en France, l'électricité utilisée lors de la fabrication des matériaux a de plus été contextualisée en utilisant le mix marginal constant. Pour l'ensemble des procédés d'arrière-plan, les procédés marginaux de production sont modélisés par les procédés moyens.

Une alternative serait d'utiliser la base conséquentielle long terme développée par ecoinvent. Les principales hypothèses de modélisation prises pour cette base sont les suivantes :

- Les marchés de recyclage ou de valorisation de déchets sont contraints et ne participent pas au mix marginaux de production.
- Les co-produits d'une activité donnent lieu à une substitution. Par exemple, le traitement de déchets produisant de la chaleur va éviter la production de chaleur du marché marginal de production de chaleur.

Certains procédés seront très peu affectés par le changement de base, comme par exemple la production du béton (Figure 165). Pour le béton, les procédés marginaux de production sont équivalents aux procédés moyens et la majorité des impacts intervient tôt dans la chaîne de valeur. La différence entre plusieurs types de béton va alors être plus marquée que la différence entre les systèmes de modélisation.

D'autres procédés, notamment ceux dont la filière recyclage représente un marché non négligeable, peuvent être affectés de manière importante, à l'image de l'acier (Figure 165). Dans la base « conseq », il y a peu de différences entre la filière primaire et la filière secondaire (arc électrique) car cette dernière est contrainte (la consommation d'acier recyclée entraîne la production d'acier primaire). Le fait de conserver la base APOS permet de faire des choix spécifiques si le contexte du projet et l'économie locale, le justifient. En utilisant la base conséquentielle, les « conséquences » peuvent être occultées par les processus en chaîne considérés (tiers) et ainsi ne pas être perçues par l'analyste.

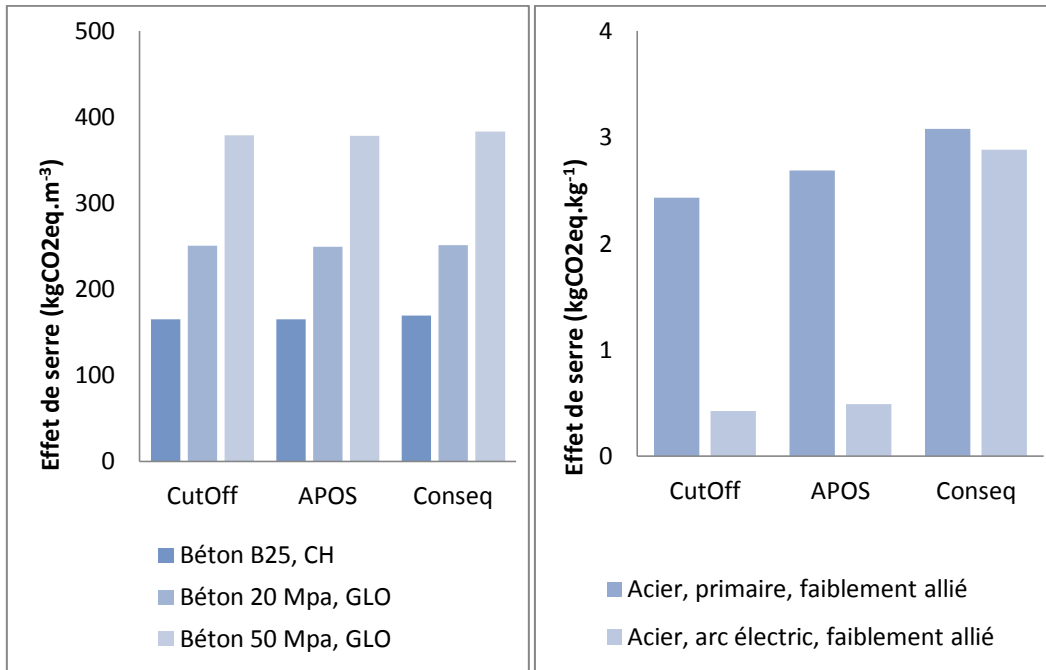


Figure 165 : Comparaison des bétons et des aciers dans les trois systèmes de modélisation écoinvent v3, pour l'indicateur d'effet de serre

Concernant la fourniture d'électricité, le mix conséquentiel pour la France dans la base conséquentielle est constitué principalement de nucléaire (81 %), d'hydraulique (9 %), de gaz et de charbon (7 %). Il compte également un faible pourcentage d'éolien (3 %). Ce mix est en forte contradiction avec les analyses et calculs effectués au Chapitre 2 et au Chapitre 4.

L'utilisation de la base conséquentielle pour l'éco-conception des bâtiments est intéressante mais doit se faire de concert avec le développement d'outils d'analyse de contribution poussée (analyse des tiers) sans quoi l'interprétation des résultats risque d'être biaisée. En l'état, l'utilisation de la base APOS associée à une contextualisation du mix électrique pour les matériaux produits en France semble préférable.

6.2.7. Modélisation de la fin de vie en ACVC, filière recyclage : le cas de l'acier

Dans l'étude de cas présentée, l'évaluation de l'inventaire de flux associé à la fin de vie de l'acier dépend de l'hypothèse faite sur l'état du marché de l'acier au moment de la démolition du bâtiment. Deux cas de figure sont possibles :

- Après la réalisation du projet, l'exploitation des gisements miniers continue de produire du fer et la part du recyclage augmente sans pour autant permettre de couvrir l'intégralité de la demande. Celle-ci reste donc dépendante de la production minière.
- Entre la réalisation du projet et sa fin de vie, l'extraction de fer et des autres composants de l'acier (alliages) devient obsolète et le recyclage devient l'unique façon de produire de l'acier.

Le premier cas de figure est celui qui a été considéré dans l'étude de cas. Il implique qu'en fin de vie, l'acier recyclé ou réutilisé va permettre d'éviter la production d'acier primaire. Dans le deuxième cas, on considère que d'ici la fin de vie du bâtiment, la filière de production d'acier primaire disparaîtra. L'acier sortant du cycle de vie pour être recyclé ou réutilisé est simplement envoyé en centre de tri. La ressource est restituée mais il n'y a pas d'impact (ou de bénéfice) associé au recyclage. La production d'acier (filiale recyclage) n'est plus liée au cycle de vie du projet, elle devient la conséquence d'une demande extérieure en acier : la production n'est plus contrainte.

Ces deux cas de figure ont été appliqués au cycle de vie d'un kilo d'acier d'armature en considérant, comme dans l'étude de cas, 59 % de recyclage, 7 % de réutilisation et 34 % de mise en décharge III. Le résultat de la comparaison est présenté à la Figure 166.

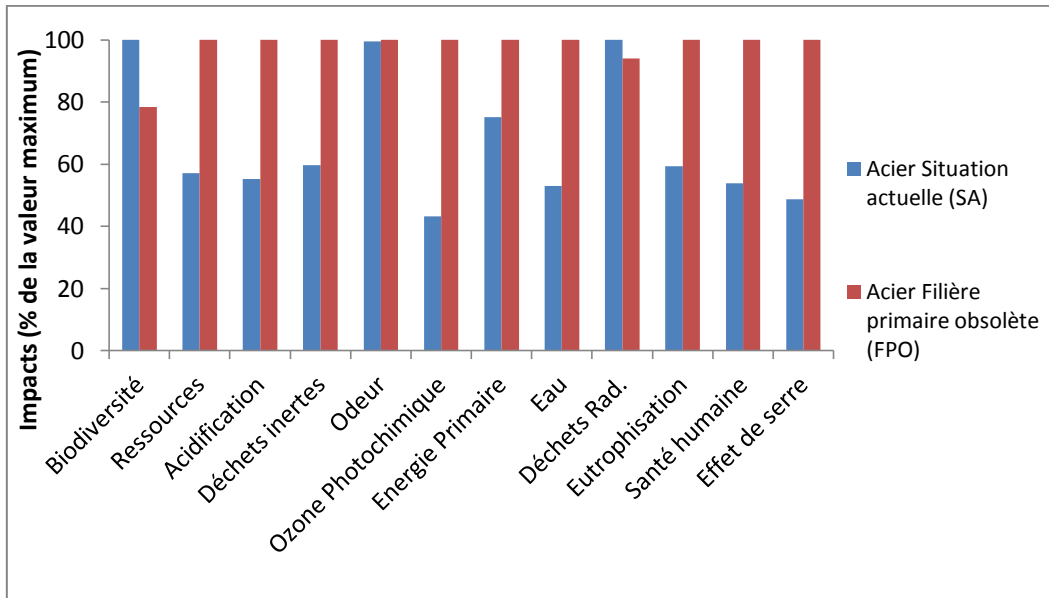


Figure 166 : Comparaison de l'ACV de l'acier en fonction du contexte de fin de vie

La situation actuelle est plutôt favorable à l'acier par rapport à la possibilité d'un arrêt de la filière primaire, les bénéfices du recyclage sont importants et influence fortement le bilan en cycle de vie. Le bilan FPO (rouge) varie peu en fonction du taux de recyclage et de réutilisation (seuls les impacts de la mise décharge sont affectés).

L'hypothèse de la permanence de la situation actuelle dans le futur semble le compromis le plus acceptable pour permettre une valorisation du recyclage qui reste actuellement un enjeu important pour l'acier.

Les différents contextes pourraient toutefois être utiles dans le cadre d'analyses de sensibilités et d'incertitudes appliquées à la comparaison de différents matériaux ou composants (e.g. fenêtre aluminium, bois ou PVC).

6.3. CONCLUSION DU CHAPITRE

Les différents développements méthodologiques constituant l'approche conséquentielle-projet présentés dans les précédents chapitres de cette thèse ont été appliqués à un projet de quartier. Tous les contributeurs quartier sont importants pour un ou plusieurs indicateurs environnementaux, même si les transports et la consommation d'énergie dans les bâtiments sont dominants.

Une décision de conception comme le zonage du plan masse (localisation des activités) peut avoir des effets à la fois sur les transports et sur la consommation d'énergie. Ces effets doivent donc être évalués de façon conjointe afin d'optimiser le bilan global du projet et ne pas déplacer les impacts entre contributeurs.

La comparaison des variantes de conception montre l'importance de dépasser les niveaux réglementaires de consommation énergétique afin d'améliorer le bilan du projet.

En perspective, il serait utile de reproduire l'exercice effectué ici sur un projet de réhabilitation. Il est probable que les bâtiments anciens seront plus vulnérables aux effets du changement climatiques.

D'autre part, différentes stratégies de réhabilitation pourraient être examinées, jusqu'à l'introduction de nouveaux services dans le quartier (changement d'usage des bâtiments) et les impacts associés en terme de mobilité. Des plans de rénovation séquentiels pourraient également être étudiés au prisme de l'ACVC-P en tenant compte à la fois des aspects marginaux et des aspects prospectifs pour déterminer les actions prioritaires à entreprendre.

CONCLUSIONS DE LA THÈSE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Conclusions

Pour comparer des variantes d'un projet dans un objectif d'écoconception, il convient d'évaluer les conséquences environnementales de chaque variante. Une approche d'ACV conséquentielle est alors plus appropriée qu'une étude « attributionnelle ». Celle-ci évaluerait le bâtiment *a posteriori* et chercherait à faire un bilan des impacts environnementaux attribuables, allouables, selon un principe de responsabilité environnementale, au bâtiment/quartier étudié.

Ce changement de point de vue, par rapport à l'ACV attributionnelle utilisée jusqu'ici, a des conséquences sensibles sur l'élaboration des inventaires de cycle de vie. Les hypothèses de modélisation prises dépendent de la nature de l'étude mais également de la disponibilité des données et du niveau de connaissance de l'arrière-plan du projet. Dans ce contexte, une modélisation attributionnelle des inventaires peut être vue comme une première approximation d'une ACV conséquentielle.

Le développement d'une approche « conséquentielle-projet » pour l'écoconception des ensembles bâtis implique de tenir compte des particularités de ce secteur : les interactions entre le parc bâti et les infrastructures urbaines (notamment dans le cas des quartiers), l'importance de la consommation d'énergie dans le bilan global et la longue durée de vie des systèmes étudiés. Le terme « projet » illustre la petite échelle étudiée par rapport à l'économie nationale ou mondiale. L'approche considère les contraintes de production existantes et connues (marché du recyclage par exemple) mais néglige les effets de marché (effet sur les prix, effets rebond) qui ne peuvent être étudiés que dans le contexte d'une étude macro-économique. La focalisation sur les ensembles bâtis implique de renforcer les connaissances des interactions entre les bâtiments et les autres secteurs. Les cas du transport des usagers, du traitement des déchets d'activités et de la consommation ou production d'électricité ont donc été traités de façon approfondie.

Contributions

Si certaines approches et hypothèses de modélisation étaient déjà utilisées auparavant sans être précisément reliées à la nature attributionnelle ou conséquentielle de l'étude, la thèse démontre l'importance de la formalisation d'une méthodologie homogène. Par exemple, la modélisation des impacts évités (associée à l'ACV conséquentielle) utilisant un mix moyen de production peut

conduire à des paradoxes, comme illustré sur le cas de la production photovoltaïque sur site.

Le modèle de simulation dynamique du système électrique développé dans la thèse permet une évaluation au pas de temps horaire des impacts de l'électricité. Cette évaluation peut être basée sur la détermination d'un mix moyen ou d'un mix marginal et ainsi améliorer la précision des études ACV attributionnelle comme conséquentielle. Un cadre d'étude cohérent avec la simulation thermique dynamique a été construit en articulant la modélisation autour de données météorologiques types identiques. Une vague de froid ou de chaleur a des impacts simultanés sur le comportement du bâtiment et sur la production d'électricité : ces effets sont pris en compte grâce à l'élaboration de ce cadre commun. Le développement de ce modèle permettra d'intégrer dans l'ACV des stratégies de gestion innovantes des bâtiments (p. ex. effacement des pointes) et améliore la précision de l'étude des impacts de la production locale d'électricité (p. ex. photovoltaïque, cogénération).

La longue durée de vie des ensembles bâtis et l'importance de la consommation d'énergie dans le bilan environnemental a conduit à l'introduction de scénarios prospectifs dans l'ACV des bâtiments et des quartiers. Ces scénarios peuvent être utilisés dans le cadre d'une étude attributionnelle ou conséquentielle-projet. Les deux approches sont détaillées dans la thèse. Une collaboration avec le Centre de Mathématiques Appliquées de Mines ParisTech a permis d'intégrer des résultats de modélisation prospective concernant l'évolution du mix électrique à l'horizon 2050. Ces scénarios ont été couplés à l'analyse des scénarios climatiques développés par le GIEC. La méthodologie proposée a été testée sur des études de cas qui ont montré que l'évolution technologique et l'évolution climatique étaient des paramètres faisant varier les résultats de l'ACV de façon importante.

Le développement de l'approche conséquentielle-projet appliquée aux ensembles bâtis nécessite un ajustement des méthodes existantes et l'établissement d'un cadre d'étude homogène. Des méthodologies spécifiques aux cas du transport des habitants et du traitement des déchets à l'échelle des quartiers ont été développées. Le couplage avec un outil de simulation de la mobilité locale permet de tenir compte des conditions de trafic et donc évalue de façon plus précise les distances parcourues par mode ainsi que les émissions directes de CO₂, NO_x et particules fines. Ce travail a été réalisé grâce à une collaboration avec le laboratoire Ville Mobilité Transport et L'Institut pour la Transition Énergétique *Efficacity*, situés à Champs-sur-Marne.

Perspectives

Suite aux recommandations de l'*ILCD Handbook*, à une initiative de la Commission européenne publiée récemment (Chomkamsri et al., 2011) et à d'importants efforts de recherche produits ces dernières années concernant les indicateurs environnementaux (spatialisation des impacts, différenciations temporelles, développement de nouvelles méthodologies), une nouvelle révision des indicateurs environnementaux considérés dans cette thèse serait nécessaire. Un état de l'art des méthodes existantes a été réalisé, suivi par la participation à un séminaire international, dans le but de contribuer à l'élaboration d'un nouveau set d'indicateurs pour l'écoconception des bâtiments. Le compte-rendu de ce séminaire, élaboré conjointement avec Guillaume Audard, Anne de Bortoli et Marie-Lise Pannier est proposé en Annexe U de cette thèse.

Le modèle proposé pour la simulation dynamique du secteur électrique pourrait être amélioré. La possibilité de stockage dynamique devrait être intégrée. Une différenciation régionale plus poussée est également un axe d'amélioration important, notamment pour l'évaluation de la production renouvelable ou les impacts du changement climatique sur le fonctionnement des centrales thermiques. Le lien automatique avec des informations sur l'état actuel du réseau pourrait constituer un progrès significatif pour le modèle, dont la mise à jour doit être régulière. Cela pourrait donner lieu à une collaboration plus approfondie avec les gestionnaires du réseau électrique. La modélisation horaire de la production d'électricité ouvre également la voie à une analyse d'impact basée sur des facteurs de caractérisation dépendant des conditions météorologiques. L'étude de la problématique de l'ozone photochimique (Hauschild, 2006b ; Tang et al., 2015) est un exemple emblématique d'un phénomène saisonnier devenu un enjeu de santé publique prégnant.

L'importance de la collaboration multidisciplinaire pour l'étude des quartiers a été soulignée à de multiples reprises dans cette thèse et des bases de travail ont été posées (transport, réseau de chaleur, réseau électrique, modélisation prospective). L'effort doit être poursuivi, en particulier avec des sociologues

L'intégration des outils transports pourrait être plus développée, notamment concernant la spatialisation des émissions locales. Cette thématique n'a pas été traitée dans le cadre de cette thèse mais constitue une importante voie de recherche pour l'amélioration de la précision des inventaires de flux. L'étude spatialement différenciée des effets respiratoires de la pollution de l'air (création d'ozone photochimique, particules fines) apparaît comme un thème transversal qui pourrait être traité de façon intégrée pour le domaine des transports et de la production d'énergie (chaleur, électricité). Les dimensions spatiales et temporelles pourraient être intégrées notamment pour la caractérisation des oxydes d'azote (Shah et Ries, 2009). La principale difficulté réside dans la quantité

de données à traiter pour gérer la désagrégation des modèles. Des outils statistiques comme les analyses de « cluster » permettraient de diminuer le nombre de données en créant des jours ou des plages horaires-types.

La collaboration avec des experts en modélisation prospective initiée dans le cadre de cette thèse appelle à des échanges plus systématiques entre les deux disciplines. L'intégration de scénarios plus nombreux et diversifiés tant au niveau technologique que climatique permettrait de renforcer la robustesse des premiers résultats obtenus, notamment concernant la part des énergies renouvelables dans le mix. Les développements actuels d'analyses de sensibilité et d'incertitude appliquées aux outils de simulation thermique dynamique pourraient être mis à profit (Spitz et al., 2012b). Des outils de STD intègrent des fonctionnalités de génération automatique de variantes (EnergyPlus Team, 2011 ; Recht et al., 2014). Ils ont la capacité de démultiplier le potentiel de la méthodologie prospective proposée dans cette thèse en permettant le traitement automatique d'un nombre conséquent de scénarios prospectifs et de variantes de conception. En complément des analyses d'incertitudes sur les caractéristiques du bâti, sur le comportement des occupants et sur les données d'ACV, les incertitudes sur le contexte futur (climat, technologies) constitueraient un 4ème pôle d'étude. Si le couplage informatique n'est pas un verrou en soi, la quantité supplémentaire de données et d'hypothèses à traiter en est un. En fonction des objectifs de l'étude, un ou plusieurs pôles d'incertitudes pourraient être considérés. Par exemple, une analyse sur les changements de mode de vie peut activer le comportement des occupants et la prospective, sans se pencher sur le bâti et l'ACV. L'intégration des outils est puissante mais la fiabilité de l'information obtenue peut décroître rapidement avec le nombre d'hypothèses faites.

D'autre part, l'analyse dispensée par les outils de modélisation prospective eux-mêmes pourrait directement inclure l'ensemble du cycle de vie des systèmes énergétiques. Quelques premiers calculs ont été faits sur ce thème dans cette thèse mais n'ont pas été systématisés à l'intérieur du cœur de calcul des outils de modélisation prospective. De récentes avancées méthodologiques sur l'ACV dynamique comptabilisent le forçage radiatif cumulé sur un horizon donné (Levasseur et al., 2010). Cette approche est bien adaptée à l'étude de scénarios de transition pour lesquelles un objectif est fixé à long terme. L'urgence climatique impose aujourd'hui de tenir compte de la temporalité des émissions. Les scénarios peuvent nécessiter à court terme des investissements et donc des émissions importantes en GES et à long terme des émissions plus faibles (p. ex. énergie solaire qui génère des GES en phase de fabrication mais pas durant la phase d'utilisation). De nouveaux modèles ont par ailleurs été développés pour avoir une vision intégrée des scénarios de transition énergétique. Ainsi, le modèle THEMIS incorpore dans un modèle hybride IO-ACV les évolutions acquises les

années précédentes (e.g. mix énergétique) pour évaluer les technologies futures (Gibon et al., 2015).

À noter que seul l'aspect énergétique a été traité de façon approfondie concernant la prospective. Or, les autres secteurs, par exemple les transports et les déchets peuvent également fortement évoluer dans le futur et la méthodologie devrait être généralisée.

La prise en compte de la biodiversité locale dans les études ACV des projets urbains est un autre enjeu interdisciplinaire. Il mériterait un effort de recherche conséquent. De même que dans le cas du couplage entre simulation transport et ACV, il s'agirait de faire dialoguer les outils d'analyse de la biodiversité locale avec les outils d'ACV. La complémentarité des deux études est essentielle pour les projets urbains (Henry et Frascaria-Lacoste, 2012 ; Curran et al., 2016). L'intégration des impacts locaux sur la biodiversité pourrait également permettre de tenir compte d'aménagements ayant des effets positifs sur la biodiversité (complémentation des espaces, diversité des habitats, perméabilité des sols). Cela permettrait de pouvoir comparer différentes propositions d'aménagements ayant à la fois des impacts directs (locaux) et/ou indirects (consommation de matériaux, d'énergie, etc.) sur la biodiversité. Le vocabulaire utilisé et les objets étudiés par les écologues et les analystes ACV diffèrent fortement. L'élaboration de métriques communes est un des principaux enjeux d'une intégration dans l'ACV des pratiques locales concernant la biodiversité. Ce couplage imposerait d'obtenir pour l'ACV une plus grande spécialisation dans la caractérisation des impacts (spatialisation notamment), une évaluation plus fine des différents contextes locaux (espèces présentes) et des actions engagées (e.g. aménagement d'un plan d'eau). Il oblige parallèlement les études locales à produire une vision plus agrégée, synthétisée et quantitative et à accepter de ce fait une perte d'information (aspects qualitatifs notamment). Au-delà de la biodiversité, la problématique des impacts locaux concerne également les impacts sur la santé humaine, ce qui ouvre un autre champ de recherche.

L'analyse du cycle de vie s'étend petit à petit à des sujets et des systèmes toujours plus complexes : des produits manufacturés fabriqués en série dans les années 1960 aux bâtiments dans les années 1990 puis aux quartiers dans les années 2000. Une des prochaines étapes concerne le passage à l'échelle de la ville et/ou du territoire. Des premiers travaux existent sur ce thème (Larsen et Hertwich, 2010 ; Loiseau et al., 2012) mais le développement d'outils d'aide à la décision à destination des planificateurs urbains reste un défi majeur. Une analyse conséquente de projet de développement urbain devra intégrer l'économie locale, probablement à travers des modèles hybrides régionaux. Les outils IO ou « entrées-sorties » permettent d'analyser différentes échelles du ménage au pays en passant par la ville (Munksgaard et al., 2005). Leur hybridation avec l'analyse de cycle de vie autorise l'évaluation de changements technologiques. Des

exemples existent à l'échelle urbaine concernant le traitement des eaux usées (Lin, 2009). Cette voie méthodologique prometteuse devrait être creusée concernant les projets de développement urbains ou territoriaux, intégrant à la fois les bâtiments et espaces publics (le secteur de la construction), l'énergie, les transports, le traitement des déchets, l'eau, et abordant les impacts globaux et locaux en termes de santé humaine et de biodiversité locale.

CONFÉRENCES ET ARTICLES À COMITÉS DE LECTURE

Articles publiés et soumis dans des revues de rang A

PUBLIÉS :

ROUX, C., SCHALBART, P. et PEUPOORTIER, B., 2016. Accounting for temporal variation of electricity production and consumption in the LCA of an energy-efficient house. In : *Journal of Cleaner Production*. 1 février 2016. Vol. 113, p. 532-540. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.11.052.

ROUX, C., SCHALBART, P., ASSOUMOU, E. et PEUPOORTIER, B. Integrating climate change and energy mix scenarios in LCA of Buildings and Districts. In : *Applied Energy*. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.10.043

EN COURS DE PUBLICATION:

ROUX, C., SCHALBART, P. et PEUPOORTIER, B. Development of an electricity system model to allow dynamic and marginal in LCA – tested in the French context of space heating in buildings. In : *Journal of Life Cycle Assessment*.

Participation à des conférences internationales

IBPSA – 2013 : oral

ROUX, C., PEUPOORTIER, B. 2013. Evaluation of the environmental performance of buildings using life cycle simulation. In : *Proceedings of BS2013*. Chambéry, France, août 2013.

SBWORLD – 2014: poster

ROUX, C., PEUPOORTIER, B. 2014. Considering temporal variation in the life cycle assessment of buildings, application to electricity consumption and production. In : *Proceedings of SB14*. Barcelona, Spain, octobre 2014.

LCM – 2015 : oral

ROUX, C., PEUPOORTIER, B. 2015. Application of life cycle assessment in urban projects. In : *Proceedings of LCM15*. Bordeaux, France, août 2015.

Principales participations à des conférences nationales ou européennes

IBPSA – 2016 : oral

ROUX, C., SCHALBART, P., PEUPOORTIER, B. 2016. Analyse de cycle de vie conséquentielle appliquée à l'étude d'une maison individuelle. In : *Proceedings of IBPSA-France*. Champs-sur-Marne, France, mai 2016.

SBE – 2016 : oral

ROUX, C., HERFRAY, G., SCHALBART, P. PEUPOORTIER, B. 2016. Life cycle assessment as a design aid tool for urban projects, in proceedings of *Sustainable Built*

Environment (SBE) Regional conférence. Expanding Boundaries : System thinking for the Built Environment, Zurich, Suisse, juin 2016.

SETAC – 2016 (soumis)

ROUX, C., KOTELNIKOVA, N., SCHALBART, P. PEUPORTIER, B. 2016. LCA of urban development projects: coupling LCA and transport simulation tools. SETAC Case Study Symposium, Montpellier, septembre 2016.

BIBLIOGRAPHIE

A. GREENING, L., GREENE, D. L. et DIFIGLIO, C., 2000. Energy efficiency and consumption — the rebound effect — a survey. In : *Energy Policy*. juin 2000. Vol. 28, n° 6–7, p. 389–401. DOI 10.1016/S0301-4215(00)00021-5.

ABDELOUADOUD, S. Y., 2014. *Integration of renewable energies in the electricity distribution system* [en ligne]. phdthesis. S.I. : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. [Consulté le 7 mai 2015]. Disponible à l'adresse : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01144518/document>.

ABDELOUADOUD, S. Y., GIRARD, R. et GUIOT, T., 2013. Planning-oriented yearly simulation of energy storage operation in distribution system for profit maximization, voltage regulation and reserve provisioning. In : *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*. S.I. : s.n. 2013. p. 1-4.

ABDELOUADOUD, S. Y., GIRARD, R., NEIRAC, F. P. et GUIOT, T., 2015. Optimal power flow of a distribution system based on increasingly tight cutting planes added to a second order cone relaxation. In : *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. juillet 2015. Vol. 69, p. 9-17. DOI 10.1016/j.ijepes.2014.12.084.

ADEME, 2007. MODECOM 2007-2008. In : ADEME [en ligne]. 2007. [Consulté le 5 juillet 2016]. Disponible à l'adresse : <http://www.ademe.fr/expertises/dechets/chiffres-cles-observations/dossier/caracterisation-dechets/resultats>.

ADEME, 2010a. Carbon Footprint guidelines. In : [en ligne]. 2010. [Consulté le 29 avril 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.associationbilancarbhone.fr/private/88/field-fichier/guides_facteurs_demissions_v6.1.zip.

ADEME, 2010b. *Simulation climat 2030-2050 des bâtiments BBC - Evaluation du comportement des bâtiments « BBC » dans les conditions climatiques prévues à échéance 2030 et 2050 en Languedoc Roussillon* - [en ligne]. S.I. ADEME. [Consulté le 27 avril 2015]. Disponible à l'adresse : http://www3.ademe.fr/languedoc-roussillon/docs/SIMUL%20BBC%202030-2050-Rapport%20final_IZUBA%C3%A9nergies.pdf.

ADEME, 2012. *Bâtiment - Édition 2012 - Chiffres clés* [en ligne]. 2012. S.I. : s.n. [Consulté le 31 juillet 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=86827&p1=02&p2=02&ref=17597>.

ADEME, 2013. L'exercice de prospective de l'ADEME « Vision 2030-2050 » Document technique. In : [en ligne]. juin 2013. [Consulté le 18 avril 2014]. Disponible à l'adresse : http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=7857ED870D9000860DE6D83CF922812C_tomcatlocal1372167097759.pdf.

ADEME, 2015a. Déchets : Chiffres clés - Edition 2015. In : [en ligne]. 2015. [Consulté le 5 février 2016]. Disponible à l'adresse : http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-dechets-201507_8500.pdf.

ADEME, 2015b. *Vers un mix électrique 100% renouvelable en 2050* [en ligne]. S.I. ADEME. [Consulté le 27 avril 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/rapport100enr_comite.pdf.

ADEME/MAAP, 2009. Disponibilité de la ressource bois-énergie : études ADEME et MAAP - Réseaux de chaleur et territoires. In : [en ligne]. 2009. [Consulté le 24 avril 2015]. Disponible à l'adresse : <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/disponibilite-de-la-ressource-bois-energie-etudes-ademe-et-maap>.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLACKER, K., SOUZA, D. M. de et SALA, S., 2014. Land use impact assessment in the construction sector: an analysis of LCIA models and case study application. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 novembre 2014. Vol. 19, n° 11, p. 1799-1809. DOI 10.1007/s11367-014-0781-7.
- ALLEN, M. R., BARROS, V. R., BROOME, J., CRAMER, W., CHRIST, R., CHURCH, J. A., CLARKE, L., DAHE, Q., DASGUPTA, P., DUBASH, N. K. et OTHERS, 2014. IPCC Fifth Assessment Synthesis Report-Climate Change 2014 Synthesis Report. In : [en ligne]. 2014. [Consulté le 7 avril 2016]. Disponible à l'adresse : <http://www.citeulike.org/group/15400/article/13416115>.
- AMOR, M. B., GAUDREAU, C., PINEAU, P.-O. et SAMSON, R., 2014. Implications of integrating electricity supply dynamics into life cycle assessment: A case study of renewable distributed generation. In : *Renewable Energy*. septembre 2014. Vol. 69, p. 410-419. DOI 10.1016/j.renene.2014.03.063.
- ASSOUMOU, DOUDARD et GUTTIEREZ, 2015. *Evaluation prospective de l'impact CO2 du kWh électrique en France dans l'optique d'une ACV conséquentielle*. S.l. Chaire Ecoconception des ensembles bâtis.
- ASSOUMOU, E., 2006. *Modélisation MARKAL pour la planification énergétique long terme dans le contexte français* [en ligne]. THESE. S.l. : École Nationale Supérieure des Mines de Paris. [Consulté le 12 février 2014]. Disponible à l'adresse : <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00002752>.
- AZEVEDO, L. B., HENDERSON, A. D., VAN ZELM, R., JOLLIET, O. et HUIJBREGTS, M. A. J., 2013. Assessing the Importance of Spatial Variability versus Model Choices in Life Cycle Impact Assessment: The Case of Freshwater Eutrophication in Europe. In : *Environmental Science & Technology*. 3 décembre 2013. Vol. 47, n° 23, p. 13565-13570. DOI 10.1021/es403422a.
- B. POLSTER, 1995. *Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie*. S.l. : Ecole des Mines de Paris.
- BABIKER, M. H., CRIQUI, P., ELLERMAN, A. D., REILLY, J. M. et VIGUIER, L. L., 2003. Assessing the Impact of Carbon Tax Differentiation in the European Union. In : *Environmental Modeling & Assessment*. 1 septembre 2003. Vol. 8, n° 3, p. 187-197. DOI 10.1023/A:1025543207122.
- BAEK, N. C., SHIN, U. C. et YOON, J. H., 2005. A study on the design and analysis of a heat pump heating system using wastewater as a heat source. In : *Solar Energy*. mars 2005. Vol. 78, n° 3, p. 427-440. DOI 10.1016/j.solener.2004.07.009.
- BAITZ, M., ALBRECHT, S., BRAUNER, E., BROADBENT, C., CASTELLAN, G., CONRATH, P., FAVA, J., FINKBEINER, M., FISCHER, M., PALMER, P. F. i., KRINKE, S., LEROY, C., LOEBEL, O., MCKEOWN, P., MERSIOWSKY, I., MÖGINGER, B., PFAADT, M., REBITZER, G., ROTHER, E., RUHLAND, K., SCHANSSEMA, A. et TIKANA, L., 2012. LCA's theory and practice: like ebony and ivory living in perfect harmony? In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 31 juillet 2012. Vol. 18, n° 1, p. 5-13. DOI 10.1007/s11367-012-0476-x.
- BEIRÃO, G. et SANSFIELD CABRAL, J. A., 2007. Understanding attitudes towards public transport and private car: A qualitative study. In : *Transport Policy*. novembre 2007. Vol. 14, n° 6, p. 478-489. DOI 10.1016/j.tranpol.2007.04.009.
- BELCHER, S. E., HACKER, J. N. et POWELL, D. S., 2005. Constructing design weather data for future climates. In : *Building Services Engineering Research and Technology*. 2 janvier 2005. Vol. 26, n° 1, p. 49-61. DOI 10.1191/0143624405bt1120a.
- BELOIN-SAINT-PIERRE, D., 2012. *Vers une caractérisation spatiotemporelle pour l'analyse du cycle de vie* [en ligne]. S.l. : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

[Consulté le 11 octobre 2013]. Disponible à l'adresse : <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00857936>.

BENNETT, E., CARPENTER, S., PETERSON, G., CUMMING, G., ZUREK, M. et PINGALI, P., 2003. Why global scenarios need ecology. In : *Frontiers in Ecology and the Environment*. 1 août 2003. Vol. 1, n° 6, p. 322-329. DOI 10.1890/1540-9295(2003)001[0322:WGSNE]2.0.CO;2.

BERGER, G., BOURBON-BUSSET, J. et MASSE, P., 2007. *De la prospective: Textes fondamentaux de la prospective française (1955-1966)*. S.l. : Editions L'Harmattan. ISBN 978-2-296-18281-3.

BERGER, M., VAN DER ENT, R., EISNER, S., BACH, V. et FINKBEINER, M., 2014. Water Accounting and Vulnerability Evaluation (WAVE): Considering Atmospheric Evaporation Recycling and the Risk of Freshwater Depletion in Water Footprinting. In : *Environmental Science & Technology*. 15 avril 2014. Vol. 48, n° 8, p. 4521-4528. DOI 10.1021/es404994t.

BERRILL, P., ARVESEN, A., SCHOLZ, Y., GILS, H. C. et HERTWICH, E. G., 2016. Environmental impacts of high penetration renewable energy scenarios for Europe. In : *Environmental Research Letters*. 2016. Vol. 11, n° 1, p. 14012. DOI 10.1088/1748-9326/11/1/014012.

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. In : *Energy and Buildings*. juin 2010. Vol. 42, n° 6, p. 869-880. DOI 10.1016/j.enbuild.2009.12.009.

BOUCKAERT, S., ASSOUMOU, E., SELOSSE, S. et MAÏZI, N., 2014. A prospective analysis of waste heat management at power plants and water conservation issues using a global TIMES model. In : *Energy*. 15 avril 2014. Vol. 68, p. 80-91. DOI 10.1016/j.energy.2014.02.008.

BOUCKAERT, S., MAZURIC, V., ASSOUMOU, E. et MAÏZI, N., 2013. Smart grids and power supply reliability: The impact of demand response on future power mixes. In : [en ligne]. S.l. : IEEE. juin 2013. p. 1-5. [Consulté le 11 mars 2014]. Disponible à l'adresse : http://hal-enscm.archives-ouvertes.fr/view_by_stamp.php?&halsid=2c8qo2n6v99rbibg953ojgsl7&label=ENSMP&langue=fr&action_todo=view&id=hal-00933168&version=1.

BOULAY, A.-M., MOTOSHITA, M., PFISTER, S., BULLE, C., MUÑOZ, I., FRANCESCHINI, H. et MARGNI, M., 2015. Analysis of water use impact assessment methods (part A): evaluation of modeling choices based on a quantitative comparison of scarcity and human health indicators. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 janvier 2015. Vol. 20, n° 1, p. 139-160. DOI 10.1007/s11367-014-0814-2.

BRANDER, M., TIPPER, R., HUTCHISON, C. et DAVIS, G., 2008. *Technical Paper: Consequential and attributional approaches to LCA: a Guide to policy makers with specific reference to greenhouse gas LCA of biofuels* [en ligne]. S.l. : Econometrica Press. [Consulté le 16 novembre 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0804_Ecometrica_-_Consequential_and_attributional_approaches_to_LCA.pdf.

BROWN, P. D., PEAS LOPES, J. A. et MATOS, M. A., 2008. Optimization of Pumped Storage Capacity in an Isolated Power System With Large Renewable Penetration. In : *IEEE Transactions on Power Systems*. mai 2008. Vol. 23, n° 2, p. 523-531. DOI 10.1109/TPWRS.2008.919419.

BRUN, A., SPITZ, C., WURTZ, E. et MORA, L., 2009. Behavioural comparison of some predictive tools used in a low-energy building. In : *Eleventh International IBPSA Conference*. S.l. : s.n. 2009. p. 27-30.

BURNHAM, A., HAN, J., CLARK, C. E., WANG, M., DUNN, J. B. et PALOU-RIVERA, I., 2012. Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Shale Gas, Natural Gas, Coal, and Petroleum. In :

BIBLIOGRAPHIE

Environmental Science & Technology. 17 janvier 2012. Vol. 46, n° 2, p. 619-627.
DOI 10.1021/es201942m.

BUYLE, M.,BRAET, J. et AUDENAERT, A., 2014. Life Cycle Assessment of an Apartment Building: Comparison of an Attributional and Consequential Approach. In : *Energy Procedia*. 2014. Vol. 62, p. 132-140. DOI 10.1016/j.egypro.2014.12.374.

BYRD, R.,HRIBAR, M. et NOCEDAL, J., 1999. An Interior Point Algorithm for Large-Scale Nonlinear Programming. In : *SIAM Journal on Optimization*. 1 janvier 1999. Vol. 9, n° 4, p. 877-900. DOI 10.1137/S1052623497325107.

CABEZA, L. F.,RINCÓN, L.,VILARIÑO, V.,PÉREZ, G. et CASTELL, A., 2014. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. janvier 2014. Vol. 29, p. 394-416.
DOI 10.1016/j.rser.2013.08.037.

CANALS, L. M. i,BAUER, C.,DEPESTELE, J.,DUBREUIL, A.,KNUCHEL, R. F.,GAILLARD, G.,MICHELSEN, O.,MÜLLER-WENK, R. et RYDGREN, B., 2006. Key Elements in a Framework for Land Use Impact Assessment Within LCA (11 pp). In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 6 juin 2006. Vol. 12, n° 1, p. 5-15. DOI 10.1065/lca2006.05.250.

CATALÃO, J. P. S.,MARIANO, S. J. P. S.,MENDES, V. M. F. et FERREIRA, L. A. F. M., 2007. Short-term electricity prices forecasting in a competitive market: A neural network approach. In : *Electric Power Systems Research*. août 2007. Vol. 77, n° 10, p. 1297-1304.
DOI 10.1016/j.epsr.2006.09.022.

CHAN, A. L. S., 2011. Developing future hourly weather files for studying the impact of climate change on building energy performance in Hong Kong. In : *Energy and Buildings*. octobre 2011. Vol. 43, n° 10, p. 2860-2868. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.07.003.

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. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 mars 2012. Vol. 17, n° 3, p. 270-276. DOI 10.1007/s11367-011-0359-6.

CHERUBINI, F.,GUEST, G. et STRØMMAN, A. H., 2012. Application of probability distributions to the modeling of biogenic CO₂ fluxes in life cycle assessment. In : *GCB Bioenergy*. 2012. Vol. 4, n° 6, p. 784-798. DOI 10.1111/j.1757-1707.2011.01156.x.

CHEVALIER, J., 2009. ACV Utilisation dans le secteur de la construction. In : [en ligne]. 2009. [Consulté le 27 novembre 2012]. Disponible à l'adresse : <http://www.techniques-ingenieur.fr/res/pdf/encyclopedia/42566210-g5880.pdf>.

CHOMKHAMRSRI, K.,WOLF, M.-A. et PANT, R., 2011. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Review Schemes for Life Cycle Assessment. In : FINKBEINER, M. (éd.), *Towards Life Cycle Sustainability Management* [en ligne]. S.l. : Springer Netherlands. p. 107-117. [Consulté le 4 février 2014]. ISBN 978-94-007-1898-2. Disponible à l'adresse : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-1899-9_11.

CITHERLET, S. et DEFAUX, T., 2007. Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span. In : *Building and Environment*. février 2007. Vol. 42, n° 2, p. 591-598. DOI 10.1016/j.buildenv.2005.09.025.

CLARK, C. E.,HORNER, R. M. et HARTO, C. B., 2013. Life Cycle Water Consumption for Shale Gas and Conventional Natural Gas. In : *Environmental Science & Technology*. 15 octobre 2013. Vol. 47, n° 20, p. 11829-11836. DOI 10.1021/es4013855.

- 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. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 mars 2013. Vol. 18, n° 3, p. 538-552. DOI 10.1007/s11367-012-0528-2.
- COLLINGE, W. O., LIAO, L., XU, H., SAUNDERS, C. L., BILEC, M. M., LANDIS, A. E., JONES, A. K. et SCHAEFER, L. A., 2011. Enabling dynamic life cycle assessment of buildings with wireless sensor networks. In : *2011 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)*. S.l. : s.n. 2011. p. 1-6.
- COLOMBERT, M., CHASTENET, C. D., DIAB, Y., GOBIN, C., HERFRAY, G., JARRIN, T., PEUPOORTIER, B., TARDIEU, C. et TROCMÉ, M., 2011. Analyse du cycle de vie à l'échelle du quartier: un outil d'aide à la décision ? Le cas de la ZAC Claude Bernard à Paris (France). In : *Environnement Urbain / Urban Environment*. 2011. Vol. 5, p. c1-c21.
- COMMISSARIAT À L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (CEA), 2010. DTS/DR/2010/022 : *Projet ANR Habisol 2008, SIMINTHEC L1-1, Plateforme INCAS, Description des bâtiments test et des éléments et systèmes contenus*. Rapport technique. S.l. CEA Liten.
- CONNOLLY, D., LUND, H., MATHIESEN, B. V. et LEAHY, M., 2010. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. In : *Applied Energy*. avril 2010. Vol. 87, n° 4, p. 1059-1082. DOI 10.1016/j.apenergy.2009.09.026.
- COONEY, G., HAWKINS, T. R. et MARRIOTT, J., 2013. Life Cycle Assessment of Diesel and Electric Public Transportation Buses. In : *Journal of Industrial Ecology*. 1 octobre 2013. Vol. 17, n° 5, p. 689-699. DOI 10.1111/jiec.12024.
- CRAWFORD, R. H., TRELOAR, G. J., FULLER, R. J. et BAZILIAN, M., 2006. Life-cycle energy analysis of building integrated photovoltaic systems (BiPVs) with heat recovery unit. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. décembre 2006. Vol. 10, n° 6, p. 559-575. DOI 10.1016/j.rser.2004.11.005.
- CURRAN, M. A., MANN, M. et NORRIS, G., 2005. The international workshop on electricity data for life cycle inventories. In : *Journal of Cleaner Production*. juin 2005. Vol. 13, n° 8, p. 853-862. DOI 10.1016/j.jclepro.2002.03.001.
- CURRAN, M., DE BAAN, L., DE SCHRYVER, A. M., VAN ZELM, R., HELLWEG, S., KOELLNER, T., SONNEMANN, G. et HUIJBREGTS, M. A. J., 2011. Toward Meaningful End Points of Biodiversity in Life Cycle Assessment†. In : *Environmental Science & Technology*. 1 janvier 2011. Vol. 45, n° 1, p. 70-79. DOI 10.1021/es101444k.
- CURRAN, M., MAIA DE SOUZA, D., ANTÓN, A., TEIXEIRA, R. F. M., MICHELSEN, O., VIDAL-LEGAZ, B., SALA, S. et MILÀ I CANALS, L., 2016. How Well Does LCA Model Land Use Impacts on Biodiversity?—A Comparison with Approaches from Ecology and Conservation. In : *Environmental Science & Technology*. 15 mars 2016. Vol. 50, n° 6, p. 2782-2795. DOI 10.1021/acs.est.5b04681.
- DANDRES, T., 2012. *Développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie conséquentielle prospective macroscopique: évaluation d'une politique de bioénergie dans l'union européenne à l'horizon 2025* [en ligne]. S.l. : École Polytechnique de Montréal. [Consulté le 27 juillet 2015]. Disponible à l'adresse : <http://publications.polymtl.ca/881/>.
- DANDRES, T., GAUDREAU, C., TIRADO-SECO, P. et SAMSON, R., 2012. Macroanalysis of the economic and environmental impacts of a 2005–2025 European Union bioenergy policy using the GTAP model and life cycle assessment. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. février 2012. Vol. 16, n° 2, p. 1180-1192. DOI 10.1016/j.rser.2011.11.003.

BIBLIOGRAPHIE

- DEL DUCE, A., 2011. Life Cycle Assessment of conventional and electric bicycles. In : *Eurobike 2011 conference* [en ligne]. S.l. : s.n. 2011. [Consulté le 4 avril 2016]. Disponible à l'adresse : http://www.eurobike-show.com/eb-wAssets/daten/rahmenprogramm/pdf/LifeCycleAssessment_DelDuce_englisch.pdf.
- DILL, J. et VOROS, K., 2007. Factors Affecting Bicycling Demand: Initial Survey Findings from the Portland, Oregon, Region. In : *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1 décembre 2007. Vol. 2031, p. 9-17. DOI 10.3141/2031-02.
- DITTMAR, M., 2013. The end of cheap uranium. In : *Science of The Total Environment*. 1 septembre 2013. Vol. 461-462, p. 792-798. DOI 10.1016/j.scitotenv.2013.04.035.
- DODOO, A., GUSTAVSSON, L. et BONAKDAR, F., 2014. Effects of Future Climate Change Scenarios on Overheating Risk and Primary Energy Use for Swedish Residential Buildings. In : *Energy Procedia*. 2014. Vol. 61, p. 1179-1182. DOI 10.1016/j.egypro.2014.11.1048.
- DOKA, G., 2007. Life cycle inventories of waste treatment services. In : *Ecoinvent report* [en ligne]. 2007. n° 13. [Consulté le 30 mars 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.doka.ch/13_I_WasteTreatmentGeneral.pdf.
- DONES, R., MÉNARD, M. et GANTNER, U., 1998. Choice of electricity-mix for different LCA applications. In : *6 th LCA Case Studies Symposium SETAC-Europe* [en ligne]. Belgium : s.n. 1998. [Consulté le 15 février 2013]. Disponible à l'adresse : http://gabe.web.psi.ch/pdfs/infel/SETAC_Symposium_Brussels_1998.pdf.
- DONEY, S. C., FABRY, V. J., FEELY, R. A. et KLEYPAS, J. A., 2009. Ocean Acidification: The Other CO2 Problem. In : *Annual Review of Marine Science*. 2009. Vol. 1, n° 1, p. 169-192. DOI 10.1146/annurev.marine.010908.163834.
- DROUINEAU, M., MA'IZI, N., ASSOUMOU, E., MAZAUIC, V. et OTHERS, 2010. TIMES model for the Reunion Island: addressing reliability of electricity supply. In : [en ligne]. 2010. [Consulté le 18 septembre 2012]. Disponible à l'adresse : <http://hal-sde.archives-ouvertes.fr/hal-00508605/>.
- DROUINEAU, M., MAŽI, N. et MAZAUIC, V., 2014. Impacts of intermittent sources on the quality of power supply: The key role of reliability indicators. In : *Applied Energy*. 1 mars 2014. Vol. 116, p. 333-343. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.11.069.
- EARLES, J. et HALOG, A., 2011. Consequential life cycle assessment: a review. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2011. Vol. 16, n° 5, p. 445-453. DOI 10.1007/s11367-011-0275-9.
- EC-JRC, 2010. *Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment - First edition - ILCD-Handbook-* [en ligne]. S.l. [Consulté le 29 juillet 2015]. Disponible à l'adresse : <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>.
- ECOINVENT, 2010. *International Reference Life Cycle Data System Handbook*. S.l. : s.n. Ecoinvent Data v2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. www.ecoinvent.ch ILCD. 2010.
- EDF, 2015. Les STEP (stations de transfert d'énergie par pompage). In : *Chercheur EDF* [en ligne]. 2015. [Consulté le 21 janvier 2015]. Disponible à l'adresse : <http://chercheurs.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Innovation/Publications/technodevoilee/UTDstepWeb.pdf>.
- EKVALL, 2000. 2000-01-1479 : *Moral Philosophy, Economics, and Life Cycle Inventory Analysis* [en ligne]. SAE Technical Paper. Warrendale, PA. SAE International. [Consulté le 8 juillet 2015]. Disponible à l'adresse : <http://papers.sae.org/2000-01-1479/>.

- EKVALL, T., 2002. Cleaner production tools: LCA and beyond. In : *Journal of Cleaner Production*. octobre 2002. Vol. 10, n° 5, p. 403-406. DOI 10.1016/S0959-6526(02)00026-4.
- EKVALL, T. et ANDRAE, A., 2006. Attributional and Consequential Environmental Assessment of the Shift to Lead-Free Solders (10 pp). In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2006. Vol. 11, n° 5, p. 344-353. DOI 10.1065/lca2005.05.208.
- EKVALL, T., TILLMAN, A.-M. et MOLANDER, S., 2005. Normative ethics and methodology for life cycle assessment. In : *Journal of Cleaner Production*. novembre 2005. Vol. 13, n° 13-14, p. 1225-1234. DOI 10.1016/j.jclepro.2005.05.010.
- EKVALL, T. et WEIDEMA, B., 2004. System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2004. Vol. 9, n° 3, p. 161-171. DOI 10.1007/BF02994190.
- ENERGYPLUS TEAM, 2011. *Engineering reference EnergyPlus* [en ligne]. 13 octobre 2011. S.I. : US Department of Energy. Disponible à l'adresse : <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>.
- ENERTECH, A., 2007. REMODECE European research Project on Electricity consumption in residential Buildings. French report. In : [en ligne]. 2007. [Consulté le 7 mars 2013]. Disponible à l'adresse : <http://remodece.isr.uc.pt/>.
- ERCAN, T. et TATARI, O., 2015. A hybrid life cycle assessment of public transportation buses with alternative fuel options. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 15 juillet 2015. Vol. 20, n° 9, p. 1213-1231. DOI 10.1007/s11367-015-0927-2.
- ERLANDSSON, M. et BORG, M., 2003. Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services—today practice and development needs. In : *Building and Environment*. juillet 2003. Vol. 38, n° 7, p. 919-938. DOI 10.1016/S0360-1323(03)00031-3.
- FAVRE, B., 2013. *Etude de stratégies de gestion énergétique des bâtiments par l'application de la programmation dynamique* [en ligne]. Thèse de doctorat. S.I. : École nationale supérieure des mines de Paris. [Consulté le 9 octobre 2014]. Disponible à l'adresse : <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00957327>.
- FAVRE, B. et PEUPOORTIER, B., 2014. Application of dynamic programming to study load shifting in buildings. In : *Energy and Buildings*. octobre 2014. Vol. 82, p. 57-64. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.07.018.
- 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. In : *Journal of Environmental Management*. octobre 2009. Vol. 91, n° 1, p. 1-21. DOI 10.1016/j.jenvman.2009.06.018.
- FLOREZ, J. Z., 2012. *Etudes de commande par décomposition-coordination pour l'optimisation de la conduite de vallées hydroélectriques* [en ligne]. S.I. : Université de Grenoble. [Consulté le 15 novembre 2013]. Disponible à l'adresse : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00745001>.
- FOEN, 2006. *The Ecological Scarcity Method – Eco-Factors 2006* - [en ligne]. S.I. [Consulté le 11 mars 2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01031/index.html?lang=en>.
- FÖRSTER, H. et LILLIESTAM, J., 2009. Modeling thermoelectric power generation in view of climate change. In : *Regional Environmental Change*. 12 novembre 2009. Vol. 10, n° 4, p. 327-338. DOI 10.1007/s10113-009-0104-x.

BIBLIOGRAPHIE

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. In : *Building and Environment*. août 2015. Vol. 90, p. 51-59. DOI 10.1016/j.buildenv.2015.03.022.

FREES, N., 2007. Crediting aluminium recycling in LCA by demand or by disposal. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 26 juin 2007. Vol. 13, n° 3, p. 212-218. DOI 10.1065/lca2007.06.348.

FRISCHKNECHT, R., BRAUNSCHWEIG, A., HOFSTETTER, P. et SUTER, P., 2000. Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment. In : *Environmental Impact Assessment Review*. avril 2000. Vol. 20, n° 2, p. 159-189. DOI 10.1016/S0195-9255(99)00042-6.

FRISCHKNECHT, R., JUNGBLUTH, N., ALTHAUS, H. J., DOKA, G., HECK, T., HELLWEG, S., HISCHIER, R., NEMECEK, T., REBITZER, G. et SPIELMANN, M., 2007. Overview and methodology. In : *Ecoinvent report* [en ligne]. 2007. n° 1. [Consulté le 20 juin 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/01_OverviewAndMethodology.pdf.

FRISCHKNECHT, R. et REBITZER, G., 2005. The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database. In : *Journal of Cleaner Production*. novembre 2005. Vol. 13, n° 13-14, p. 1337-1343. DOI 10.1016/j.jclepro.2005.05.002.

FRISCHKNECHT, R. et STUCKI, M., 2010. Scope-dependent modelling of electricity supply in life cycle assessments. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2010. Vol. 15, n° 8, p. 806-816. DOI 10.1007/s11367-010-0200-7.

FRISCHKNECHT, R., WYSS, F., KNÖPFEL, S. B., LÜTZKENDORF, T. et BALOUKTSI, M., 2015. Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 12 mai 2015. Vol. 20, n° 7, p. 957-969. DOI 10.1007/s11367-015-0897-4.

FTHENAKIS, V. M. et KIM, H. C., 2007. Greenhouse-gas emissions from solar electric- and nuclear power: A life-cycle study. In : *Energy Policy*. avril 2007. Vol. 35, n° 4, p. 2549-2557. DOI 10.1016/j.enpol.2006.06.022.

GÄRLING, T. et SCHUITEMA, G., 2007. Travel Demand Management Targeting Reduced Private Car Use: Effectiveness, Public Acceptability and Political Feasibility. In : *Journal of Social Issues*. 1 mars 2007. Vol. 63, n° 1, p. 139-153. DOI 10.1111/j.1540-4560.2007.00500.x.

GEYER, R., STOMS, D. M., LINDNER, J. P., DAVIS, F. W. et WITTSTOCK, B., 2010. Coupling GIS and LCA for biodiversity assessments of land use. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 23 mars 2010. Vol. 15, n° 5, p. 454-467. DOI 10.1007/s11367-010-0170-9.

GHG PROTOCOL, 2007. *Guidelines for Quantifying GHG Reductions from Grid-Connected Electricity Projects* [en ligne]. S.l. [Consulté le 2 mars 2016]. Disponible à l'adresse : http://ghgprotocol.org/files/ghgp/electricity_final.pdf.

GIBON, T., WOOD, R., ARVESEN, A., BERGESEN, J. D., SUH, S. et HERTWICH, E. G., 2015. A Methodology for Integrated, Multiregional Life Cycle Assessment Scenarios under Large-Scale Technological Change. In : *Environmental Science & Technology*. 15 septembre 2015. Vol. 49, n° 18, p. 11218-11226. DOI 10.1021/acs.est.5b01558.

GIEC, 2013. Changement Climatiques 2013. Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs. In : [en ligne]. 2013. [Consulté le 11 février 2014]. Disponible à l'adresse : http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/docs/WG1AR5_SPM_brochure_fr.pdf.

GIMENO-GUTIÉRREZ, M., LACAL-ARÁNTEGUI, R., EUROPEAN COMMISSION, JOINT RESEARCH CENTRE et INSTITUTE FOR ENERGY AND TRANSPORT, 2013. *Assessment of the European*

potential for pumped hydropower energy storage a GIS-based assessment of pumped hydropower storage potential. [en ligne]. Luxembourg : Publications Office. [Consulté le 7 avril 2015]. ISBN 978-92-79-29511-9. Disponible à l'adresse : <http://dx.publications.europa.eu/10.2790/86815>.

GIRAUDET, L.-G., 2011. *Les instruments économiques de maîtrise de l'énergie : une évaluation multidimensionnelle* [en ligne]. THESE. S.I. : Université Paris-Est. [Consulté le 29 octobre 2013]. Disponible à l'adresse : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00599374>.

GIRAUDET, L.-G., GUIVARCH, C. et QUIRION, P., 2012. Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modeling. In : *Energy Economics*. mars 2012. Vol. 34, n° 2, p. 426-445. DOI 10.1016/j.eneco.2011.07.010.

GOEDKOOOP, M. J., HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M., DE SCHRYVER, A. et VAN ZELM, R., 2009. ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation; In : <http://www.lcia-recipe.net> [en ligne]. janvier 2009. [Consulté le 8 septembre 2014]. Disponible à l'adresse : https://35f23ee4-a-62cb3a1a-sites.googlegroups.com/site/lciarecipe/file-cabinet/ReCiPe_main_report_REVISED_13-07-2012.pdf?attachauth=ANoY7c4KjSVAClr8yEXPQs7eKrYWecXBHy-Ue4cU0adgY91n0YxpQsgqr8c4HJtRKLHzUw5GFzjHiMe6pTL7nuZodX95kmCxS_XqpeWTwl7sgdqT0s49s-XOueTmNFCWfemMZLEqL0zyS4mv_ORQUjygSv6oeci8SkfEszkoxlqG8UU0diCT-qLWRalmKtDrOo574BmjauPb6n7s6dS0Cy1WUwa21-ikYH8g75VOsR7c8uf-SVHzgm6JxRYjRwq_UzsniaAra5DZ5RUD4XpJTXVqSoBl6F5gjg%3D%3D&attredirects=0.

GOEDKOOOP, M. et SPRIENSMA, R., 2001. *The Eco-indicator99: a damage oriented method for life cycle impact assessment: methodology report* [en ligne]. S.I. [Consulté le 16 juillet 2014]. Disponible à l'adresse : <http://irs.ub.rug.nl/dbi/4581696db734f>.

GOMES, F., BRIÈRE, R., FERAILLE, A., HABERT, G., LASVAUX, S. et TESSIER, C., 2013. Adaptation of environmental data to national and sectorial context: application for reinforcing steel sold on the French market. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 juin 2013. Vol. 18, n° 5, p. 926-938. DOI 10.1007/s11367-013-0558-4.

GONDAL, I. A. et SAHIR, M. H., 2011. Review of Modelling Tools for Integrated Renewable Hydrogen Systems. In : *Proceedings of International Conference on Environmental Science and Technology (ICEST 2011)* [en ligne]. S.I. : s.n. 2011. [Consulté le 27 juillet 2012]. Disponible à l'adresse : <http://www.ipcbee.net/vol6/no2/79-F20088.pdf>.

GRIMAUD, J., 2015. *ACV Eau et Déchets - Cité Descartes*. Champs-sur-Marne. Efficacity. Rapport interne.

GUAN, L., 2009. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings. In : *Building and Environment*. avril 2009. Vol. 44, n° 4, p. 793-800. DOI 10.1016/j.buildenv.2008.05.021.

GUIAVARCH, A., 2003. *Etude de l'amélioration de la qualité environnementale du bâtiment par intégration de composants solaires*. Thèse de doctorat. S.I. : Université de Cergy-Pontoise.

GUIAVARCH, A. et PEUPORTIER, B., 2006. Photovoltaic collectors efficiency according to their integration in buildings. In : *Solar Energy*. janvier 2006. Vol. 80, n° 1, p. 65-77. DOI 10.1016/j.solener.2005.07.004.

GUINEE, J., 2002. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2002. Vol. 7, n° 5, p. 311-313. DOI 10.1007/BF02978897.

BIBLIOGRAPHIE

- GUINEE, J. B., 2002. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 septembre 2002. Vol. 7, n° 5, p. 311-313. DOI 10.1007/BF02978897.
- GUINÉE, J. B., HEIJUNGS, R., HUPPES, G., ZAMAGNI, A., MASONI, P., BUONAMICI, R., EKVALL, T. et RYDBERG, T., 2010. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future†. In : *Environ. Sci. Technol.* 2010. Vol. 45, n° 1, p. 90-96. DOI 10.1021/es101316v.
- GUINÉE, J. B., HEIJUNGS, R. et VOET, E. van der, 2009. A greenhouse gas indicator for bioenergy: some theoretical issues with practical implications. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 7 mai 2009. Vol. 14, n° 4, p. 328-339. DOI 10.1007/s11367-009-0080-x.
- GUITON, M. et BENETTO, E., 2013. Etude 2012-01 : Analyse du cycle de vie conséquentielle : identification des conditions de mise en oeuvre et des bonnes pratiques [en ligne]. S.l. SCORE-LCA. [Consulté le 30 juin 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.scorelca.org/espace_mb/etudes/SCORE-2012-01-synthfr-8q01apo9cm-1.pdf.
- HAAS, R. et BIERMAYR, P., 2000. The rebound effect for space heating Empirical evidence from Austria. In : *Energy Policy*. juin 2000. Vol. 28, n° 6-7, p. 403-410. DOI 10.1016/S0301-4215(00)00023-9.
- HALVGAARD, R., POULSEN, N. K., MADSEN, H. et JORGENSEN, J. B., 2012. Economic Model Predictive Control for building climate control in a Smart Grid. In : *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES*. S.l. : s.n. janvier 2012. p. 1-6.
- HAUSCHILD, M., 2006a. Spatial Differentiation in Life Cycle Impact Assessment: A decade of method development to increase the environmental realism of LCIA. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 janvier 2006. Vol. 11, n° 1, p. 11-13. DOI 10.1065/lca2006.04.005.
- HAUSCHILD, M., 2006b. Spatial Differentiation in the Characterisation of Photochemical Ozone Formation: The EDIP2003 Methodology. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 janvier 2006. Vol. 11, n° 1, p. 72-80. DOI 10.1065/lca2006.04.014.
- HELLWEG, S. et CANALS, L. M. i, 2014. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. In : *Science*. 6 juin 2014. Vol. 344, n° 6188, p. 1109-1113. DOI 10.1126/science.1248361.
- HENRY, A. et FRASCARIA-LACOSTE, N., 2012. Comparing green structures using life cycle assessment: a potential risk for urban biodiversity homogenization? In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 26 juin 2012. Vol. 17, n° 8, p. 949-950. DOI 10.1007/s11367-012-0462-3.
- HERFRAY, G., 2011a. Contribution à l'évaluation des impacts environnementaux des quartiers [en ligne]. S.l. : École Nationale Supérieure des Mines de Paris. [Consulté le 3 décembre 2012]. Disponible à l'adresse : <http://tel.archives-ouvertes.fr/pastel-00658220/>.
- HERFRAY, G., 2011b. Contribution à l'évaluation des impacts environnementaux des quartiers [en ligne]. Thèse de doctorat. S.l. : École Nationale Supérieure des Mines de Paris. [Consulté le 3 décembre 2012]. Disponible à l'adresse : <http://tel.archives-ouvertes.fr/pastel-00658220/>.
- HERTWICH, E. G., 2008. Consumption and the Rebound Effect: An Industrial Ecology Perspective. In : *Journal of Industrial Ecology*. 8 février 2008. Vol. 9, n° 1-2, p. 85-98. DOI 10.1162/1088198054084635.

HERTWICH, E. G. et PETERS, G. P., 2009. Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-Linked Analysis. In : *Environ. Sci. Technol.* 2009. Vol. 43, n° 16, p. 6414-6420. DOI 10.1021/es803496a.

HIDALGO, J., MASSON, V. et BAEHR, C., 2014. From daily climatic scenarios to hourly atmospheric forcing fields to force Soil-Vegetation-Atmosphere transfer models. In : *Frontiers in Environmental Science* [en ligne]. 13 octobre 2014. Vol. 2. [Consulté le 13 mai 2015]. DOI 10.3389/fenvs.2014.00040. Disponible à l'adresse : <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fenvs.2014.00040/abstract>.

HIMPE, E., TRAPPERS, L., DEBACKER, W., DELGHUST, M., LAVERGE, J., JANSSENS, A., MOENS, J. et VAN HOLM, M., 2013. Life cycle energy analysis of a zero-energy house. In : *Building Research and Information*. 2013. Vol. 41, n° 4, p. 435-449. DOI 10.1080/09613218.2013.777329.

HIPPERT, H. S., PEDREIRA, C. E. et SOUZA, R. C., 2001. Neural networks for short-term load forecasting: a review and evaluation. In : *IEEE Transactions on Power Systems*. février 2001. Vol. 16, n° 1, p. 44-55. DOI 10.1109/59.910780.

HÖJER, M. et MATTSSON, L.-G., 2000. Determinism and backcasting in future studies. In : *Futures*. septembre 2000. Vol. 32, n° 7, p. 613-634. DOI 10.1016/S0016-3287(00)00012-4.

HOUDANT, B., 2004. *Contribution à l'amélioration de la prévision hydrométéorologique opérationnelle. Pour l'usage des probabilités dans la communication entre acteurs.* [en ligne]. S.l. : ENGREF (AgroParisTech). [Consulté le 15 novembre 2013]. Disponible à l'adresse : <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00000925>.

HOWARTH, R. W., SANTORO, R. et INGRAFFEA, A., 2011. Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations. In : *Climatic Change*. 12 avril 2011. Vol. 106, n° 4, p. 679-690. DOI 10.1007/s10584-011-0061-5.

HUBER, I., BUGLIARO, L., PONATER, M., GARNY, H., EMDE, C. et MAYER, B., 2016. Do climate models project changes in solar resources? In : *Solar Energy*. mai 2016. Vol. 129, p. 65-84. DOI 10.1016/j.solener.2015.12.016.

HUGREL, C. et JOUMARD, R., 2004. Transport routier-Parc, usage et émissions des véhicules en France de 1970 à 2025. In : [en ligne]. 2004. [Consulté le 20 juin 2016]. Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00546091/>.

HULTMAN, N., REBOIS, D., SCHOLTEN, M. et RAMIG, C., 2011. The greenhouse impact of unconventional gas for electricity generation. In : *Environmental Research Letters*. 1 octobre 2011. Vol. 6, n° 4, p. 44008. DOI 10.1088/1748-9326/6/4/044008.

HURTADO, L. A., NGUYEN, P. H. et KLING, W. L., 2015. Smart grid and smart building inter-operation using agent-based particle swarm optimization. In : *Sustainable Energy, Grids and Networks*. juin 2015. Vol. 2, p. 32-40. DOI 10.1016/j.segan.2015.03.003.

ITEN, R., FRISCHKNECHT, R. et STUCKI, M., 2012. Life cycle inventories of electricity mixes and grid. In : *ESU-services Ltd., Uster* [en ligne]. 2012. [Consulté le 23 avril 2014]. Disponible à l'adresse : <http://www.esu-services.ch/fileadmin/download/publicLCI/itten-2012-electricity-mix.pdf>.

JENTSCH, M. F., BAHAJ, A. S. et JAMES, P. A. B., 2008. Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files. In : *Energy and Buildings*. 2008. Vol. 40, n° 12, p. 2148-2168. DOI 10.1016/j.enbuild.2008.06.005.

JEREZ, S., TOBIN, I., VAUTARD, R., MONTÁVEZ, J. P., LÓPEZ-ROMERO, J. M., THAIS, F., BARTOK, B., CHRISTENSEN, O. B., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., NIKULIN, G., KOTLARSKI, S., VAN MEIJGAARD, E., TEICHMANN, C. et WILD, M., 2015. The impact of climate change on photovoltaic power

BIBLIOGRAPHIE

generation in Europe. In : *Nature Communications*. 11 décembre 2015. Vol. 6, p. 10014. DOI 10.1038/ncomms10014.

JIANG, M., GRIFFIN, W. M., HENDRICKSON, C., JARAMILLO, P., VANBRIESEN, J. et VENKATESH, A., 2011. Life cycle greenhouse gas emissions of Marcellus shale gas. In : *Environmental Research Letters*. 1 juillet 2011. Vol. 6, n° 3, p. 34014. DOI 10.1088/1748-9326/6/3/034014.

JOLLIET, O., MARGNI, M., CHARLES, R., HUMBERT, S., PAYET, J., REBITZER, G. et ROSENBAUM, R., 2003. IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2003. Vol. 8, n° 6, p. 324–330.

JOLLIET, O., SAADÉ, M., CRETTEZ, P. et SHAKED, S., 2010. *Analyse du cycle de vie: Comprendre et réaliser un écobilan*. S.l. : PPUR Presses polytechniques. ISBN 978-2-88074-886-9.

JONES, G. A. et WARNER, K. J., 2016. The 21st century population-energy-climate nexus. In : *Energy Policy*. juin 2016. Vol. 93, p. 206-212. DOI 10.1016/j.enpol.2016.02.044.

KANDIL, M. S., FARGHAL, S. A. et HASANIN, N. E., 1990. Economic assessment of energy storage options in generation expansion planning. In : *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*. juillet 1990. Vol. 137, n° 4, p. 298-306.

KÄTELHÖN, A., VON DER ASSEN, N., SUH, S., JUNG, J. et BARDOW, A., 2015. Industry-Cost-Curve Approach for Modeling the Environmental Impact of Introducing New Technologies in Life Cycle Assessment. In : *Environmental Science & Technology*. 7 juillet 2015. Vol. 49, n° 13, p. 7543-7551. DOI 10.1021/es5056512.

KENDALL, A., 2012. Time-adjusted global warming potentials for LCA and carbon footprints. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 septembre 2012. Vol. 17, n° 8, p. 1042-1049. DOI 10.1007/s11367-012-0436-5.

KINTZ, P., 2012. Ordures ménagères et plâtre : le mauvais mélange propice à la formation d'hydrogène sulfuré. In : *Annales de Toxicologie Analytique*. 2012. Vol. 24, n° 2, p. 109-111. DOI 10.1051/ata/2012010.

KIRILENKO, A. P. et SEDJO, R. A., 2007. Climate change impacts on forestry. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 12 novembre 2007. Vol. 104, n° 50, p. 19697-19702. DOI 10.1073/pnas.0701424104.

KITOUS, A., CRIQUI, P., BELLEVRAT, E. et CHATEAU, B., 2010. Transformation Patterns of the Worldwide Energy System -- Scenarios for the Century with the POLES Model. In : *Energy Journal*. 2 janvier 2010. Vol. 31, p. 49-82.

KLINGLMAIR, M., SALA, S. et BRANDÃO, M., 2013. Assessing resource depletion in LCA: a review of methods and methodological issues. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 10 septembre 2013. Vol. 19, n° 3, p. 580-592. DOI 10.1007/s11367-013-0650-9.

KOLETSIS, I., KOTRONI, V., LAGOUVARDOS, K. et SOUKISSIAN, T., 2016. Assessment of offshore wind speed and power potential over the Mediterranean and the Black Seas under future climate changes. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. juillet 2016. Vol. 60, p. 234-245. DOI 10.1016/j.rser.2016.01.080.

KOTAJI, S., SCHUURMANS, A. et EDWARDS, S., 2003. *Life-cycle Assessment in Building and Construction: A State-of-the-art Report, 2003*. S.l. : SETAC. ISBN 978-1-880611-59-3.

KOUNINA, A., MARGNI, M., BAYART, J.-B., BOULAY, A.-M., BERGER, M., BULLE, C., FRISCHKNECHT, R., KOEHLER, A., CANALS, L. M. i, MOTOSHITA, M., NÚÑEZ, M., PETERS, G., PFISTER, S., RIDOUTT, B., ZELM, R. van, VERONES, F. et HUMBERT, S., 2012. Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment. In : *The International Journal of Life*

Cycle Assessment. 27 octobre 2012. Vol. 18, n° 3, p. 707-721. DOI 10.1007/s11367-012-0519-3.

KOUNKOU-ARNAUD, R., LEMONSU, A. et DESPLAT, J., 2011. Evolution du climat urbain de Paris dans la perspective du changement climatique. In : *Evolution of urban climate of Paris in the context of climate change*, *Proceedings of 2R2CV*, Université Paul Verlaine-Metz, France [en ligne]. 2011. [Consulté le 2 avril 2015]. Disponible à l'adresse : <http://www1.univ-metz.fr/recherche/labos/cegum/2R2CV/Actes/Kouunkou-Arnaud.pdf>.

KRAKOWSKI, V., ASSOUMOU, E., MAZAUIC, V. et MAÏZI, N., 2016. Feasible path toward 40–100% renewable energy shares for power supply in France by 2050: A prospective analysis. In : *Applied Energy*. 1 juin 2016. Vol. 171, p. 501-522. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.03.094.

KROEKER, K. J., KORDAS, R. L., CRIM, R., HENDRIKS, I. E., RAMAJO, L., SINGH, G. S., DUARTE, C. M. et GATTUSO, J.-P., 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. In : *Global Change Biology*. 1 juin 2013. Vol. 19, n° 6, p. 1884-1896. DOI 10.1111/gcb.12179.

LARSEN, H. N. et HERTWICH, E. G., 2010. Implementing Carbon-Footprint-Based Calculation Tools in Municipal Greenhouse Gas Inventories. In : *Journal of Industrial Ecology*. 1 décembre 2010. Vol. 14, n° 6, p. 965-977. DOI 10.1111/j.1530-9290.2010.00295.x.

LEE, H., OLIVEIRA-MARTINS, J. et VAN DER MENSBRUGGHE, D., 1994. *The OECD Green model: an updated overview* [en ligne]. S.l. : Organisation for Economic Co-operation and Development. [Consulté le 25 août 2014]. Disponible à l'adresse : <http://www.oecd.org/dev/1919148.pdf>.

LEHMANN, H., KRUSKA, M., ICHIRO, D. et OHBAYASHI, M., 2003. Energy Rich Japan: Full Report. In : *Institute for Sustainable Solutions and Innovations* [en ligne]. 2003. [Consulté le 1 septembre 2014]. Disponible à l'adresse : http://www.energyrichjapan.info/pdf/ERJ_fullreport.pdf.

LEHNER, B., CZISCH, G. et VASSOLO, S., 2005. The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis. In : *Energy Policy*. mai 2005. Vol. 33, n° 7, p. 839-855. DOI 10.1016/j.enpol.2003.10.018.

LEMONSU, A., KOUNKOU-ARNAUD, R., DESPLAT, J., SALAGNAC, J.-L. et MASSON, V., 2012. Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate. In : *Climatic Change*. 5 juillet 2012. Vol. 116, n° 3-4, p. 679-692. DOI 10.1007/s10584-012-0521-6.

LEONTIEF, W., 1970. Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach. In : *The Review of Economics and Statistics*. août 1970. Vol. 52, n° 3, p. 262. DOI 10.2307/1926294.

LESAGE, P., DESCHÊNES, L. et SAMSON, R., 2007. Evaluating Holistic Environmental Consequences of Brownfield Management Options Using Consequential Life Cycle Assessment for Different Perspectives. In : *Environmental Management*. 2007. Vol. 40, n° 2, p. 323-337. DOI 10.1007/s00267-005-0328-6.

LEURENT, F., 2010. Capacité et congestion dans les systèmes de transports de voyageurs: Analyse systémique et examen des modèles d'affectation sur un réseau. In : *Congrès ATEC-ITS* [en ligne]. S.l. : s.n. 2010. [Consulté le 6 avril 2016]. Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00669309/>.

LEURENT, F., 2012. Les modèles d'usage du sol et transport: où la géographie et l'économie se rejoignent. In : *Modélisation urbaine: de la représentation au projet* [en ligne]. 2012. [Consulté le 6 avril 2016]. Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00853508/>.

BIBLIOGRAPHIE

- LEURENT, F. et BOUJNAH, H., 2014. A user equilibrium, traffic assignment model of network route and parking lot choice, with search circuits and cruising flows. In : *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. octobre 2014. Vol. 47, Part 1, p. 28-46. DOI 10.1016/j.trc.2014.07.014.
- 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. In : *Environmental Science & Technology*. 15 avril 2010. Vol. 44, n° 8, p. 3169-3174. DOI 10.1021/es9030003.
- LEVASSEUR, A., LESAGE, P., MARGNI, M. et SAMSON, R., 2013. Biogenic Carbon and Temporary Storage Addressed with Dynamic Life Cycle Assessment. In : *Journal of Industrial Ecology*. 2013. Vol. 17, n° 1, p. 117-128. DOI 10.1111/j.1530-9290.2012.00503.x.
- LIN, C., 2009. Hybrid input-output analysis of wastewater treatment and environmental impacts: A case study for the Tokyo Metropolis. In : *Ecological Economics*. 15 mai 2009. Vol. 68, n° 7, p. 2096-2105. DOI 10.1016/j.ecolecon.2009.02.002.
- LINDNER, M., MAROSCHEK, M., NETHERER, S., KREMER, A., BARBATI, A., GARCIA-GONZALO, J., SEIDL, R., DELZON, S., CORONA, P., KOLSTRÖM, M., LEXER, M. J. et MARCHETTI, M., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. In : *Forest Ecology and Management*. 5 février 2010. Vol. 259, n° 4, p. 698-709. DOI 10.1016/j.foreco.2009.09.023.
- LIPPKE, B., ONEIL, E., HARRISON, R., SKOG, K., GUSTAVSSON, L. et SATHRE, R., 2011. Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: knowns and unknowns. In : *Carbon Management*. 1 juin 2011. Vol. 2, n° 3, p. 303-333. DOI 10.4155/cmt.11.24.
- LOISEAU, E., JUNQUA, G., ROUX, P. et BELLON-MAUREL, V., 2012. Environmental assessment of a territory: An overview of existing tools and methods. In : *Journal of Environmental Management*. 15 décembre 2012. Vol. 112, p. 213-225. DOI 10.1016/j.jenvman.2012.07.024.
- LOTTEAU, M., LOUBET, P., POUSSE, M., DUFRASNES, E. et SONNEMANN, G., 2015. Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale. In : *Building and Environment*. novembre 2015. Vol. 93, Part 2, p. 165-178. DOI 10.1016/j.buildenv.2015.06.029.
- LOTTEAU, M., LOUBET, P., POUSSE, M., DUFRASNES, E. et SONNEMANN, G., [sans date]. Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale. In : *Building and Environment* [en ligne]. [Consulté le 24 juillet 2015]. DOI 10.1016/j.buildenv.2015.06.029. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315300445>.
- LUND, H., 1985. *Short reference years and test reference years for EEC countries: Final report*. S.I. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark.
- LUND, H., 2007. EnergyPLAN-Advanced Energy Systems Analysis Computer Model-Documentation Version 7.0-<http://www.energyPLAN.eu>. In : *Aalborg University, Aalborg, Denmark*. 2007.
- LUND, H., MATHIESEN, B., CHRISTENSEN, P. et SCHMIDT, J., 2010. Energy system analysis of marginal electricity supply in consequential LCA. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2010. Vol. 15, n° 3, p. 260-271. DOI 10.1007/s11367-010-0164-7.
- MA, 2005. *Millenium Ecosystem Assessment* [en ligne]. S.I. [Consulté le 11 février 2014]. Disponible à l'adresse : <http://www.millenniumassessment.org/en/Reports.html>.

MAILHAC, A., 2015. *ACV Quartier - Cité Descartes*. Champs-sur-Marne. Efficacity. Rapport interne.

MAĀZI, N. et ASSOUMOU, E., 2014. Future prospects for nuclear power in France. In : *Applied Energy*. 31 décembre 2014. Vol. 136, p. 849-859. DOI 10.1016/j.apenergy.2014.03.056.

MAIZI, N., ASSOUMOU, E., BORDIER, M., GUERASSIMOFF, G. et MAZURIC, V., 2006. Key features of the electricity production sector through long-term planning: the french case. In : *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE'06. 2006 IEEE PES* [en ligne]. S.I. : s.n. 2006. p. 1796-1801. [Consulté le 18 septembre 2012]. Disponible à l'adresse : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4076011.

MAJEAU-BETTEZ, G., WOOD, R., HERTWICH, E. G. et STRØMMAN, A. H., 2015. When Do Allocations and Constructs Respect Material, Energy, Financial, and Production Balances in LCA and EEIO?: Respect of Balances by Allocations and Constructs. In : *Journal of Industrial Ecology*. avril 2015. p. n/a-n/a. DOI 10.1111/jiec.12273.

MALMQVIST, T., GLAUMANN, M., SCARPELLINI, S., ZABALZA, I., ARANDA, A., LLERA, E. et DÍAZ, S., 2011. Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines. In : *Energy*. avril 2011. Vol. 36, n° 4, p. 1900-1907. DOI 10.1016/j.energy.2010.03.026.

MANNE, A. et RICHEL, R., 2004. US rejection of the Kyoto Protocol: the impact on compliance costs and CO₂ emissions. In : *Energy Policy*. 2004. Vol. 32, n° 4, p. 447-454.

MATHIESEN, B. V., MÜNSTER, M. et FRUERGAARD, T., 2007. Energy system analyses of the marginal energy technology in life cycle assessments. In : [en ligne]. 2007. [Consulté le 11 juillet 2012]. Disponible à l'adresse : http://vbn.aau.dk/files/38596403/SETACGoeteborgConfProcPaper_Energy%20system%20analyses%20of%20the%20marginal%20energy%20technology%20in%20LCA.pdf.

MATHIESEN, B. V., MÜNSTER, M. et FRUERGAARD, T., 2009. Uncertainties related to the identification of the marginal energy technology in consequential life cycle assessments. In : *Journal of Cleaner Production*. octobre 2009. Vol. 17, n° 15, p. 1331-1338. DOI 10.1016/j.jclepro.2009.04.009.

MCCLEESE, D. L. et LAPUMA, P. T., 2002. Using monte carlo simulation in life cycle assessment for electric and internal combustion vehicles. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. juillet 2002. Vol. 7, n° 4, p. 230-236. DOI 10.1007/BF02978878.

MCDOWALL, W. et EAMES, M., 2006. Forecasts, scenarios, visions, backcasts and roadmaps to the hydrogen economy: A review of the hydrogen futures literature. In : *Energy Policy*. juillet 2006. Vol. 34, n° 11, p. 1236-1250. DOI 10.1016/j.enpol.2005.12.006.

MEADOWS, D., RANDERS, J. et MEADOWS, D., 2004. *Limits to Growth: The 30-Year Update*. S.I. : Chelsea Green Publishing. ISBN 978-1-60358-155-4.

METTETAL, L., 2009. *Note Rapide : La question énergétique dans l'habitat privé : le profil déterminant des ménages* [en ligne]. 2009. S.I. : Institut d'aménagement de l'urbanisme. [Consulté le 2 juin 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.iau-idf.fr/fileadmin/NewEtudes/Etude_600/NR_476.pdf.

MILÀ I CANALS, L., ROMANYÀ, J. et COWELL, S. J., 2007. Method for assessing impacts on life support functions (LSF) related to the use of 'fertile land' in Life Cycle Assessment (LCA). In : *Journal of Cleaner Production*. octobre 2007. Vol. 15, n° 15, p. 1426-1440. DOI 10.1016/j.jclepro.2006.05.005.

MINDJID, M., 2011. *Projet de recherche REPA-F4 - Annexe III - Prospectives à l'horizon 2050* [en ligne]. S.I. Fondation Batiment Energie. [Consulté le 2 juin 2015]. Disponible à l'adresse :

BIBLIOGRAPHIE

<http://www.batiment-energie.org/doc/16/Annexe-III-Guide-Prospectives-a-l-horizon-2050.pdf>.

MOHR, S. H. et EVANS, G. M., 2011. Long term forecasting of natural gas production. In : *Energy Policy*. septembre 2011. Vol. 39, n° 9, p. 5550-5560. DOI 10.1016/j.enpol.2011.04.066.

MUNARETTO, F., 2014. *Etude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments*. Paris : MINES ParisTech.

MUNKSGAARD, J., WIER, M., LENZEN, M. et DEY, C., 2005. Using Input-Output Analysis to Measure the Environmental Pressure of Consumption at Different Spatial Levels. In : *Journal of Industrial Ecology*. 1 janvier 2005. Vol. 9, n° 1-2, p. 169-185. DOI 10.1162/1088198054084699.

MÜNSTER, M. et LUND, H., 2009. Use of waste for heat, electricity and transport—Challenges when performing energy system analysis. In : *Energy*. mai 2009. Vol. 34, n° 5, p. 636-644. DOI 10.1016/j.energy.2008.09.001.

MURRAY, S. J., FOSTER, P. N. et PRENTICE, I. C., 2012. Future global water resources with respect to climate change and water withdrawals as estimated by a dynamic global vegetation model. In : *Journal of Hydrology*. 2 juillet 2012. Vol. 448-449, p. 14-29. DOI 10.1016/j.jhydrol.2012.02.044.

NÄSSÉN, J., HOLMBERG, J., WADESKOG, A. et NYMAN, M., 2007. Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: An input-output analysis. In : *Energy*. septembre 2007. Vol. 32, n° 9, p. 1593-1602. DOI 10.1016/j.energy.2007.01.002.

NÉGAWATT, [sans date]. Association négaWatt - Rapport technique du scénario négaWatt. In : [en ligne]. [Consulté le 24 avril 2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.negawatt.org/rapport-technique-p131.html>.

NGUYEN, Q.-N., 2014. Articulation temporelle des mobilités individuelles en France et impact CO2 (Des citoyens vertueux en semaine et forts émetteurs le weekend ?). In : *13e Séminaire Francophone Est-Ouest de Socio-économie des Transports* [en ligne]. S.l. : s.n. 15 avril 2014. p. 27 p. [Consulté le 1 juin 2016]. Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071603/document>.

NICHOLS, B. G. et KOCKELMAN, K., 2015. Urban form and life-cycle energy consumption: Case studies at the city scale. In : *Journal of Transport and Land Use* [en ligne]. 29 mai 2015. Vol. 8, n° 3. [Consulté le 24 mars 2016]. Disponible à l'adresse : <https://jtlu.org/index.php/jtlu/article/view/598>.

NORDHAUS, W. D., 2008. *A question of balance: Weighing the options on global warming policies* [en ligne]. S.l. : Yale University Press. [Consulté le 25 août 2014]. Disponible à l'adresse : <http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=qgeoZDu5SbQC&oi=fnd&pg=PR7&dq=a+question+of+balance&ots=gIbUruKtg0&sig=jcZRm8ZUOvIFFr0qfS8b11OT4aY>.

OLESEN, J. E. et BINDI, M., 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. In : *European Journal of Agronomy*. juin 2002. Vol. 16, n° 4, p. 239-262. DOI 10.1016/S1161-0301(02)00004-7.

OMAR, W. M. S. W., DOH, J.-H., PANUWATWANICH, K. et MILLER, D., 2014. Assessment of the embodied carbon in precast concrete wall panels using a hybrid life cycle assessment approach in Malaysia. In : *Sustainable Cities and Society*. 2014. Vol. 10, p. 101-111.

ORTIZ, O., CASTELLS, F. et SONNEMANN, G., 2010. Operational energy in the life cycle of residential dwellings: The experience of Spain and Colombia. In : *Applied Energy*. février 2010. Vol. 87, n° 2, p. 673-680. DOI 10.1016/j.apenergy.2009.08.002.

- OUZEAU, G., DÉQUÉ, M., JOUINI, M., PLANTON, S. et VAUTARD, R., 2014. *Le climat de la France au XXI^e siècle* [en ligne]. S.I. MEDDEE. [Consulté le 27 avril 2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-22612-onerc-climat-france.pdf>.
- PANNIER, M.-L., 2014. *Analyse de cycle de vie des maisons passives de la plateforme INCAS* [en ligne]. Rapport de stage. S.I. INSA de Strasbourg. Disponible à l'adresse : http://eprints2.insa-strasbourg.fr/1743/1/Pannier_Marie-Lise_GCE_-_PFE_-_Synth%C3%A8se.pdf.
- PEHNT, M., 2006. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. In : *Renewable Energy*. janvier 2006. Vol. 31, n° 1, p. 55-71. DOI 10.1016/j.renene.2005.03.002.
- PERKINS, A., HAMNETT, S., PULLEN, S., ZITO, R. et TREBILCOCK, D., 2009. Transport, Housing and Urban Form: The Life Cycle Energy Consumption and Emissions of City Centre Apartments Compared with Suburban Dwellings. In : *Urban Policy and Research*. 17 novembre 2009. Vol. 27, n° 4, p. 377-396. DOI 10.1080/08111140903308859.
- PESONEN, H., EKVALL, T., FLEISCHER, G., HUPPES, G., JAHN, C., KLOS, Z., REBITZER, G., SONNEMANN, G., TINTINELLI, A., WEIDEMA, B. et WENZEL, H., 2000. Framework for scenario development in LCA. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2000. Vol. 5, n° 1, p. 21-30. DOI 10.1007/BF02978555.
- PETERS, G. P., 2007. Efficient algorithms for Life Cycle Assessment, Input-Output Analysis, and Monte-Carlo Analysis. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 septembre 2007. Vol. 12, n° 6, p. 373-380. DOI 10.1065/lca2006.06.254.
- PEUPOORTIER, B., 1998. Le bilan énergétique global en construction. In : *Aménagement et nature - L'habitat écologique*. décembre 1998. p. 25-37.
- PEUPOORTIER, B., 2003. *Eco-conception des bâtiments: bâtir en préservant l'environnement*. S.I. : Presses des MINES. ISBN 978-2-911762-43-7.
- PEUPOORTIER, B., 2005. Bancs d'essais de logiciels de simulation thermique. In : *Proceedings SFT-IBPSA*. La Rochelle : ENSMP. mars 2005.
- PEUPOORTIER, B. et BLANC SOMMEREUX, I., 1990. Simulation Tool with Its Expert Interface for the Thermal Design of Multizone Buildings. In : *International Journal of Solar Energy*. 1990. Vol. 8, n° 2, p. 109-120. DOI 10.1080/01425919008909714.
- PEUPOORTIER, B. et HERFRAY, G., 2012. Evaluation of electricity related impacts using a dynamic LCA model. In : *International Symposium Life Cycle Assessment and Construction*. Nantes : s.n. 10 juillet 2012.
- PEUPOORTIER, B., HERFRAY, G., MALMQVIST, T., ZABALZA, I., STALLER, H., TRITTHART, W., WETZEL, C. et SZALAY, Z., 2011. Life cycle assessment methodologies in the construction sector: the contribution of the European LORE-LCA project. In : *Sustainable Building Conference, Helsinki*. (cité à la page 21.) [en ligne]. S.I. : s.n. 2011. [Consulté le 24 août 2015]. Disponible à l'adresse : [http://teide.cps.unizar.es:8080/pub/publicir.nsf/codigospub/0767/\\$FILE/cp0767.pdf](http://teide.cps.unizar.es:8080/pub/publicir.nsf/codigospub/0767/$FILE/cp0767.pdf).
- PEUPOORTIER, B., HERFRAY, G., TOVE MALMQVIST, K. T. H., IGNACIO ZABALZA, C., CHRISTIAN WETZEL, C. et ZSUZSA SZALAY, E. M. I., [sans date]. Life cycle assessment methodologies in the construction sector: the contribution of the European LORE-LCA project. In : [en ligne]. [Consulté le 28 juin 2012]. Disponible à l'adresse : [http://teide.cps.unizar.es:8080/pub/publicir.nsf/codigospub/0767/\\$FILE/cp0767.pdf](http://teide.cps.unizar.es:8080/pub/publicir.nsf/codigospub/0767/$FILE/cp0767.pdf).

BIBLIOGRAPHIE

PEUPORTIER, B., KOHLER, K. et BOONSTRA, C., 1997. European project REGENER, life cycle analysis of buildings. In : . 1997. Vol. In: 2nd International Conference « Buildings and the Environment », Paris France.

PEUPORTIER, B. L. ., 2001. Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context. In : *Energy and Buildings*. mai 2001. Vol. 33, n° 5, p. 443-450. DOI 10.1016/S0378-7788(00)00101-8.

PEUPORTIER, B., VORGER, E. et HARFRAY, G., 2012. LCA application in urban design. In : *International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction July* [en ligne]. S.I. : s.n. 2012. p. 10-12. [Consulté le 30 juin 2015]. Disponible à l'adresse : http://rilem.net/gene/main.php?base=500218&id_publication=415&id_papier=7990.

PEUPORTIER, THIERS, S. et GUIAVARCH, A., 2013. Eco-design of buildings using thermal simulation and life cycle assessment. In : *Journal of Cleaner Production*. janvier 2013. Vol. 39, n° 0, p. 73-78. DOI 10.1016/j.jclepro.2012.08.041.

PIGEON, G., ZIBOUCHE, K., BUENO, B., LE BRAS, J. et MASSON, V., 2014. Improving the capabilities of the Town Energy Balance model with up-to-date building energy simulation algorithms: an application to a set of representative buildings in Paris. In : *Energy and Buildings*. juin 2014. Vol. 76, p. 1-14. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.10.038.

PLEVIN, R. J., DELUCCHI, M. A. et CREUTZIG, F., 2014. Using Attributional Life Cycle Assessment to Estimate Climate-Change Mitigation Benefits Misleads Policy Makers. In : *Journal of Industrial Ecology*. 2014. Vol. 18, n° 1, p. 73-83. DOI 10.1111/jiec.12074.

POLSTER, B., 1995. *Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie*. Thèse de doctorat. S.I. : École nationale supérieure des mines de Paris.

POLSTER, B., PEUPORTIER, B., BLANC SOMMEREUX, I., DIAZ PEDREGAL, P., GOBIN, C. et DURAND, E., 1996a. Evaluation of the environmental quality of buildings towards a more environmentally conscious design. In : *Solar Energy*. septembre 1996. Vol. 57, n° 3, p. 219-230. DOI 10.1016/S0038-092X(96)00071-0.

POLSTER, B., PEUPORTIER, B., BLANC SOMMEREUX, I., DIAZ PEDREGAL, P., GOBIN, C. et DURAND, E., 1996b. Evaluation of the environmental quality of buildings towards a more environmentally conscious design. In : *Solar Energy*. septembre 1996. Vol. 57, n° 3, p. 219-230. DOI 10.1016/S0038-092X(96)00071-0.

POPOVICI, E., 2005. *Contribution to the life cycle assessment of settlements*. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris : s.n.

PRÉVOT, H. et ORSELLI, J., 2006. Les réseaux de chaleur. In : *Ministère de l'économie, des finances et de* [en ligne]. 2006. [Consulté le 25 mars 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.adec.fr/files_upload/documentation/200607201140510.rapport-prevot.pdf.

PRYOR, S. C. et BARTHELMIE, R. J., 2010. Climate change impacts on wind energy: A review. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14, n° 1, p. 430-437. DOI 10.1016/j.rser.2009.07.028. Scopus

RABL, A., BENOIST, A., DRON, D., PEUPORTIER, B., SPADARO, J. V. et ZOUGHAIB, A., 2007. How to account for CO2 emissions from biomass in an LCA. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. juillet 2007. Vol. 12, n° 5, p. 281-281. DOI 10.1065/lca2007.06.347.

RAICHUR, V., CALLAWAY, D. S. et SKERLOS, S. J., 2015. Estimating Emissions from Electricity Generation Using Electricity Dispatch Models: The Importance of System Operating Constraints. In : *Journal of Industrial Ecology*. 1 avril 2015. p. n/a-n/a. DOI 10.1111/jiec.12276.

RAVN, H. F., MUNKSGAARD, J., RAMSKOV, J., GROHNHEIT, P. E., LARSEN, H. V., ELKRAFT SYSTEM, RISØ NATIONAL LAB, ROSKILDE (DK). SYSTEMS ANALYSIS DEPARTMENT, AMTERNES OG KOMMUNERNES FORSKNINGSINSTITUT, C. (DK). I. of L. G. S., STOCKHOLM ENVIRONMENT INST, TALLINN CENTRE, INST. OF PHYSICAL ENERGETICS, LITHUANIAN ENERGY INST, KAUNAS, (LT), PSE International et KALININGRAD STATE UNIV, 2001. *Balmorel: a model for analyses of the electricity and CHP markets in the Baltic Sea Region. Appendices*. S.l. : s.n. ISBN 87-986969-3-9.

REAP, J., ROMAN, F., DUNCAN, S. et BRAS, B., 2008. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 août 2008. Vol. 13, n° 5, p. 374-388. DOI 10.1007/s11367-008-0009-9.

RECHT, T., MUNARETTO, F., SCHALBART, P. et PEUPORTIER, B., 2014. Analyse de la fiabilité de COMFIE par comparaison à des mesures. Application à un bâtiment passif. In : *Proceedings IBPSA France*. Arras : s.n. 20 mai 2014. p. 8.

REHL, T., LANSCHKE, J. et MÜLLER, J., 2012. Life cycle assessment of energy generation from biogas—Attributional vs. consequential approach. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. août 2012. Vol. 16, n° 6, p. 3766-3775. DOI 10.1016/j.rser.2012.02.072.

RIVALLAIN, M., 2013. *Étude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants* [en ligne]. S.l. : Paris Est. [Consulté le 9 octobre 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.theses.fr/2013PEST1038>.

ROBILLART, M., 2015. *Etude de stratégies de gestion en temps réel pour des bâtiments énergétiquement performants*. Thèse de doctorat. S.l. : École nationale supérieure des mines de Paris.

ROBINSON, D., HALDI, F., KÄMPF, J., LEROUX, P., PEREZ, D., RASHEED, A. et WILKE, U., 2009. CitySim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning. In : *Eleventh International IBPSA Conference*. 2009. p. 1083–1090.

ROSENBAUM, R. K., BACHMANN, T. M., GOLD, L. S., HUIJBREGTS, M. A. J., JOLLIET, O., JURASKE, R., KOEHLER, A., LARSEN, H. F., MACLEOD, M., MARGNI, M., MCKONE, T. E., PAYET, J., SCHUHMACHER, M., MEENT, D. van de et HAUSCHILD, M. Z., 2008. USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 novembre 2008. Vol. 13, n° 7, p. 532-546. DOI 10.1007/s11367-008-0038-4.

ROUNSEVELL, M. D. A., REGINSTER, I., ARAÚJO, M. B., CARTER, T. R., DENDONCKER, N., EWERT, F., HOUSE, J. I., KANKAANPÄÄ, S., LEEMANS, R., METZGER, M. J., SCHMIT, C., SMITH, P. et TUCK, G., 2006. A coherent set of future land use change scenarios for Europe. In : *Agriculture, Ecosystems & Environment*. mai 2006. Vol. 114, n° 1, p. 57-68. DOI 10.1016/j.agee.2005.11.027.

ROUX, C., 2013. Evaluation of the environmental performance of buildings using life cycle simulation. In : *Proceedings of BS2013*. Chambéry, France : s.n. août 2013.

ROUX, C., SCHALBART, P. et PEUPORTIER, B., 2016. Accounting for temporal variation of electricity production and consumption in the LCA of an energy-efficient house. In : *Journal of Cleaner Production*. 1 février 2016. Vol. 113, p. 532-540. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.11.052.

ROZENBERG, J., GUIVARCH, C., LEMPERT, R. et HALLEGATTE, S., 2013. Building SSPs for climate policy analysis: a scenario elicitation methodology to map the space of possible future challenges to mitigation and adaptation. In : *Climatic Change*. 13 septembre 2013. Vol. 122, n° 3, p. 509-522. DOI 10.1007/s10584-013-0904-3.

BIBLIOGRAPHIE

- RTE, 2009. *Le Bilan Electrique français 2008* [en ligne]. S.l. [Consulté le 22 avril 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.rte-france.com/sites/default/files/rte_bilan_electrique_2008.pdf.
- RTE, 2012. Bilan prévisionnel 2012 de l'équilibre offre-demande : la sécurité de l'alimentation électrique assurée jusqu'en 2015. In : [en ligne], 2012. [Consulté le 26 novembre 2012]. Disponible à l'adresse : <http://www.rte-france.com/fr/actualites-dossiers/a-la-une/bilan-previsionnel-2012-de-l-equilibre-offre-demande-la-securite-de-l-alimentation-electrique-assuree-jusqu-en-2015-1>.
- RTE, 2013a. *Actualisation du bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France* [en ligne]. 2013. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : http://www.rte-france.com/uploads/Mediatheque_docs/vie_systeme/annuelles/bilan_previsionnel/bilan_actualisation_2013_v2.pdf.
- RTE, 2013b. *Actualisation du Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France* [en ligne]. S.l. [Consulté le 21 août 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.rte-france.com/uploads/Mediatheque_docs/vie_systeme/annuelles/bilan_previsionnel/bilan_actualisation_2013_v2.pdf.
- RTE, 2013c. *Bilan Electrique Français 2013* [en ligne]. S.l. [Consulté le 25 août 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.rte-france.com/sites/default/files/bilan_electrique_2013_3.pdf.
- RTE, 2014. *Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France* [en ligne]. S.l. [Consulté le 20 août 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.rte-france.com/sites/default/files/bilan_complet_2014.pdf.
- RTE, 2015. *Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France* [en ligne]. S.l. [Consulté le 20 août 2015]. Disponible à l'adresse : www.rte-france.com/sites/default/files/bp2015.pdf.
- RUBIN, E. S., CHEN, C. et RAO, A. B., 2007. Cost and performance of fossil fuel power plants with CO₂ capture and storage. In : *Energy Policy*. septembre 2007. Vol. 35, n° 9, p. 4444-4454. DOI 10.1016/j.enpol.2007.03.009.
- SANDÉN, B. A. et KARLSTRÖM, M., 2007. Positive and negative feedback in consequential life-cycle assessment. In : *Journal of Cleaner Production*. octobre 2007. Vol. 15, n° 15, p. 1469-1481. DOI 10.1016/j.jclepro.2006.03.005.
- SANDIN, G., PETERS, G. M. et SVANSTRÖM, M., 2013. Life cycle assessment of construction materials: the influence of assumptions in end-of-life modelling. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 20 décembre 2013. Vol. 19, n° 4, p. 723-731. DOI 10.1007/s11367-013-0686-x.
- SANSOM, M. et MEIJER, J., 2002. *Life-cycle assessment (LCA) for steel construction: final report*. Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities. EUR Technical steel research Steel structures, 20570. ISBN 978-92-894-4637-2.
- SARTORI, I., NAPOLITANO, A. et VOSS, K., 2012. Net zero energy buildings: A consistent definition framework. In : *Energy and Buildings*. mai 2012. Vol. 48, p. 220-232. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.01.032.
- SCHEUER, C., KEOLEIAN, G. A. et REPPE, P., 2003. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. In : *Energy and Buildings*. novembre 2003. Vol. 35, n° 10, p. 1049-1064. DOI 10.1016/S0378-7788(03)00066-5.

- SCHLENZIG, C., 1999. Energy planning and environmental management with the information and decision support system MESAP. In : *International Journal of Global Energy Issues*. 1999. Vol. 12, n° 1/2/3/4/5/6, p. 81-91.
- SCHMIDT, J. H., THRANE, M., MERCIAI, S. et DALGAARD, R., 2011. *Inventory of country specific electricity in LCA-consequential and attributional scenarios; Methodology report v2* [en ligne]. S.I. [Consulté le 22 avril 2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.citeulike.org/group/13799/article/11926015>.
- SCHNEIDER, F., 2003. L'effet rebond. In : *L'écologiste*. 2003. Vol. 4, n° 3, p. 45-8.
- SCHRIJVERS, D. L., LOUBET, P. et SONNEMANN, G., 2016. Developing a systematic framework for consistent allocation in LCA. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 10 mars 2016. p. 1-18. DOI 10.1007/s11367-016-1063-3.
- SEPPÄLÄ, J., POSCH, M., JOHANSSON, M. et HETTELINGH, J.-P., 2006. Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator (14 pp). In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 novembre 2006. Vol. 11, n° 6, p. 403-416. DOI 10.1065/lca2005.06.215.
- SER, 2012. Le fonctionnement d'une éolienne. In : *Syndicat des Energies Renouvelables (SER)* [en ligne]. 2012. [Consulté le 6 juin 2014]. Disponible à l'adresse : http://www.enr.fr/docs/2010141144_12FEFonctionnementduneeolienne.pdf.
- SETRA, 2009. *Emissions routières de polluants atmosphériques - Courbes et facteurs d'influence* [en ligne]. 2009. S.I. : s.n. [Consulté le 18 avril 2016]. Disponible à l'adresse : <http://catalogue.setra.fr/documents/Cataloguesetra/0005/Dtrf-0005666/DT5666.pdf>.
- SETRA, 2014. *Etude sur les parc roulants routiers français - Inventaire, comparaison et impacts sur les courbes d'émission* [en ligne]. S.I. Disponible à l'adresse : www.sud-ouest.cerema.fr/IMG/pdf/5816_rapport_VF_comite.pdf.
- 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. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 juin 2009. Vol. 14, n° 4, p. 313-327. DOI 10.1007/s11367-009-0084-6.
- SHARMA, A., SAXENA, A., SETHI, M., SHREE, V. et VARUN, 2011. Life cycle assessment of buildings: A review. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. janvier 2011. Vol. 15, n° 1, p. 871-875. DOI 10.1016/j.rser.2010.09.008.
- SIMMLER, H. et BRUNNER, S., 2005. Vacuum insulation panels for building application: Basic properties, aging mechanisms and service life. In : *Energy and Buildings*. novembre 2005. Vol. 37, n° 11, p. 1122-1131. DOI 10.1016/j.enbuild.2005.06.015.
- SIMONS, A., 2013. Road transport: new life cycle inventories for fossil-fuelled passenger cars and non-exhaust emissions in ecoinvent v3. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 27 août 2013. p. 1-15. DOI 10.1007/s11367-013-0642-9.
- SKOPLAKI, E. et PALYVOS, J. A., 2009. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. In : *Solar Energy*. mai 2009. Vol. 83, n° 5, p. 614-624. DOI 10.1016/j.solener.2008.10.008.
- SMITH, V. H., TILMAN, G. D. et NEKOLA, J. C., 1999. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. In : *Environmental Pollution*. 1999. Vol. 100, n° 1-3, p. 179-196. DOI 10.1016/S0269-7491(99)00091-3.

BIBLIOGRAPHIE

SOCIÉTÉ SUISSE D'HYDROLOGIE ET DE LIMNOLOGIE SSSL AND COMMISSION D'HYDROLOGIE CHY, 2011. Les effets du changement climatique sur l'utilisation de la force hydraulique. In : *Matériaux pour l'Hydrologie de la Suisse* [en ligne]. Bern 2011. n° 38. [Consulté le 31 mars 2014]. Disponible à l'adresse : <http://www.hydrologie.unibe.ch/projekte/Rapport%20de%20synthese.pdf>.

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. In : *Energy*. décembre 2011. Vol. 36, n° 12, p. 6705-6713. DOI 10.1016/j.energy.2011.10.028.

SOLOMON, S., 2007. *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. S.l. : Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-70596-7.

SONNEMANN, G. W., SCHUHMACHER, M. et CASTELLS, F., 2003. Uncertainty assessment by a Monte Carlo simulation in a life cycle inventory of electricity produced by a waste incinerator. In : *Journal of Cleaner Production*. mai 2003. Vol. 11, n° 3, p. 279-292. DOI 10.1016/S0959-6526(02)00028-8.

SOVACOOOL, B. K., 2008. Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. In : *Energy Policy*. août 2008. Vol. 36, n° 8, p. 2950-2963. DOI 10.1016/j.enpol.2008.04.017.

SPIELMANN, M. et ALTHAUS, H.-J., 2007. Can a prolonged use of a passenger car reduce environmental burdens? Life Cycle analysis of Swiss passenger cars. In : *Journal of Cleaner Production*. 2007. Vol. 15, n° 11-12, p. 1122-1134. DOI 10.1016/j.jclepro.2006.07.022.

SPIELMANN, M., SCHOLZ, R., TIETJE, O. et HAAN, P. de, 2005. Scenario Modelling in Prospective LCA of Transport Systems. Application of Formative Scenario Analysis (11 pp). In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2005. Vol. 10, n° 5, p. 325-335. DOI 10.1065/lca2004.10.188.

SPITZ, C., MORA, L., WURTZ, E. et JAY, A., 2012a. Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house. In : *Energy and Buildings*. décembre 2012. Vol. 55, p. 459-470. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.08.013.

SPITZ, C., MORA, L., WURTZ, E. et JAY, A., 2012b. Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house. In : *Energy and Buildings*. décembre 2012. Vol. 55, p. 459-470. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.08.013.

STANTON, W. H., 2008. ORCED ModelFinal. In : [en ligne]. juin 2008. [Consulté le 1 septembre 2014]. Disponible à l'adresse : http://web.ornl.gov/sci/ees/etsd/pes/pubs/l/doc9472_orced_modelfinal.pdf.

STASINOPOULOS, P., COMPSTON, P., NEWELL, B. et JONES, H. M., 2012. A system dynamics approach in LCA to account for temporal effects—a consequential energy LCI of car body-in-whites. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 février 2012. Vol. 17, n° 2, p. 199-207. DOI 10.1007/s11367-011-0344-0.

STEEN, B. A., 2005. Abiotic Resource Depletion Different perceptions of the problem with mineral deposits. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 5 décembre 2005. Vol. 11, n° 1, p. 49-54. DOI 10.1065/lca2006.04.011.

SUH, S., 2004. Functions, commodities and environmental impacts in an ecological-economic model. In : *Ecological Economics*. 20 avril 2004. Vol. 48, n° 4, p. 451-467. DOI 10.1016/j.ecolecon.2003.10.013.

- SUH, S., LENZEN, M., TRELOAR, G. J., HONDO, H., HORVATH, A., HUPPES, G., JOLLIET, O., KLANN, U., KREWITT, W., MORIGUCHI, Y., MUNKSGAARD, J. et NORRIS, G., 2004. System Boundary Selection in Life-Cycle Inventories Using Hybrid Approaches. In : *Environmental Science & Technology*. 1 février 2004. Vol. 38, n° 3, p. 657-664. DOI 10.1021/es0263745.
- SUH, S., WEIDEMA, B., SCHMIDT, J. H. et HEIJUNGS, R., 2010. Generalized Make and Use Framework for Allocation in Life Cycle Assessment. In : *Journal of Industrial Ecology*. 2010. Vol. 14, n° 2, p. 335-353. DOI 10.1111/j.1530-9290.2010.00235.x.
- SUH, S. et YANG, Y., 2014. On the uncanny capabilities of consequential LCA. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. juin 2014. Vol. 19, n° 6, p. 1179-1184. DOI 10.1007/s11367-014-0739-9.
- TANG, L., NAGASHIMA, T., HASEGAWA, K., OHARA, T., SUDO, K. et ITSUBO, N., 2015. Development of human health damage factors for tropospheric ozone considering transboundary transport on a global scale. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 17 novembre 2015. p. 1-10. DOI 10.1007/s11367-015-1001-9.
- TILLMAN, A.-M., 2000. Significance of decision-making for LCA methodology. In : *Environmental Impact Assessment Review*. février 2000. Vol. 20, n° 1, p. 113-123. DOI 10.1016/S0195-9255(99)00035-9.
- TREYER, K. et BAUER, C., 2014. Life cycle inventories of electricity generation and power supply in version 3 of the ecoinvent database—part II: electricity markets. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 28 janvier 2014. p. 1-14. DOI 10.1007/s11367-013-0694-x.
- TROCMÉ, M., 2009. *Aide aux choix de conception de bâtiments économes en énergie* [en ligne]. S.l. : École Nationale Supérieure des Mines de Paris. [Consulté le 9 octobre 2014]. Disponible à l'adresse : <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00005892>.
- TUKKER, A., COHEN, M. J., HUBACEK, K. et MONT, O., 2010. The Impacts of Household Consumption and Options for Change. In : *Journal of Industrial Ecology*. 1 janvier 2010. Vol. 14, n° 1, p. 13-30. DOI 10.1111/j.1530-9290.2009.00208.x.
- TURCONI, R., BOLDRIN, A. et ASTRUP, T., 2013. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. décembre 2013. Vol. 28, p. 555-565. DOI 10.1016/j.rser.2013.08.013.
- VAILLANCOURT, K., LABRIET, M., LOULOU, R. et WAAUB, J.-P., 2008. The role of nuclear energy in long-term climate scenarios: An analysis with the World-TIMES model. In : *Energy Policy*. juillet 2008. Vol. 36, n° 7, p. 2296-2307. DOI 10.1016/j.enpol.2008.01.015.
- VAN ZELM, R., HUIJBREGTS, M. A. J., VAN JAARVELD, H. A., REINDS, G. J., DE ZWART, D., STRUIJS, J. et VAN DE MEENT, D., 2007. Time Horizon Dependent Characterization Factors for Acidification in Life-Cycle Assessment Based on Forest Plant Species Occurrence in Europe. In : *Environmental Science & Technology*. 1 février 2007. Vol. 41, n° 3, p. 922-927. DOI 10.1021/es061433q.
- VANDROMME, N., 2014. *Modélisation conséquentielle de la consommation d'énergie d'un groupe de serveurs générant un nuage informatique et attributionnelle des bénéfices de la virtualisation* [en ligne]. S.l. : Ecole polytechnique de Montréal. [Consulté le 7 mai 2015]. Disponible à l'adresse : http://publications.polymtl.ca/1569/1/2014_NathanVandromme.pdf.
- VANHILLE, E., 2015. *Modélisation et évaluation environnementale de la mobilité - Application à projet d'aménagement de la Cité Descartes Elargie*. Projet de fin d'étude. S.l. Département Ville Environnement Transport - Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

BIBLIOGRAPHIE

- VIEIRA, P. S. et HORVATH, A., 2008. Assessing the End-of-Life Impacts of Buildings. In : *Environ. Sci. Technol.* 2008. Vol. 42, n° 13, p. 4663-4669. DOI 10.1021/es071345l.
- VORGER, E., 2014. *Etude de l'influence du comportement des occupants sur la performance énergétique des bâtiments*. Thèse de doctorat. S.I. : École nationale supérieure des Mines de Paris.
- VORGER, E., SCHALBART, P. et PEUPORTIER, B., 2014. Etude de l'influence des occupants sur la performance énergétique des logements par le biais d'une modélisation stochastique globale. In : *IBPSA France*. Arras : s.n. 20 mai 2014.
- VUUREN, D. P. van, EDMONDS, J., KAINUMA, M., RIAHI, K., THOMSON, A., HIBBARD, K., HURTT, G. C., KRAM, T., KREY, V., LAMARQUE, J.-F., MASUI, T., MEINSHAUSEN, M., NAKICENOVIC, N., SMITH, S. J. et ROSE, S. K., 2011. The representative concentration pathways: an overview. In : *Climatic Change*. 5 août 2011. Vol. 109, n° 1-2, p. 5-31. DOI 10.1007/s10584-011-0148-z.
- WACHSMUTH, J., BLOHM, A., GÖBLING-REISEMANN, S., EICKEMEIER, T., RUTH, M., GASPER, R. et STÜHRMANN, S., 2013. How will renewable power generation be affected by climate change? The case of a metropolitan region in Northwest Germany. In : *Energy*. 2013. Vol. 58, p. 192-201. DOI 10.1016/j.energy.2013.06.035. Scopus
- WARDMAN, M., TIGHT, M. et PAGE, M., 2007. Factors influencing the propensity to cycle to work. In : *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. mai 2007. Vol. 41, n° 4, p. 339-350. DOI 10.1016/j.tra.2006.09.011.
- WEIDEMA, B., FREES, N. et NIELSEN, A.-M., 1999. Marginal production technologies for life cycle inventories. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1999. Vol. 4, n° 1, p. 48-56. DOI 10.1007/BF02979395.
- WEIDEMA, B. P., 2003. Market information in life cycle assessment. In : *Environmental project* [en ligne]. 2003. Vol. 863. [Consulté le 28 juin 2012]. Disponible à l'adresse : <http://www.norlca.org/resources/780.pdf>.
- WEIDEMA, B. P., BAUER, C., HISCHIER, R., MUTEL, C., NEMECEK, T., REINHARD, J., VADENBO, C. O. et WERNET, G., 2013. *Overview and methodology: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3* [en ligne]. S.I. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. [Consulté le 30 juin 2015]. Disponible à l'adresse : http://vbn.aau.dk/ws/files/176769045/Overview_and_methodology.pdf.
- WEIDEMA, EKVALL et HEIJUNGS, 2009. Guidelines for application of deepened and broadened LCA. In : *Deliverable D18 of work package*. 2009. Vol. 5, p. 17.
- WHITING, A. et AZAPAGIC, A., 2014. Life cycle environmental impacts of generating electricity and heat from biogas produced by anaerobic digestion. In : *Energy*. 1 juin 2014. Vol. 70, p. 181-193. DOI 10.1016/j.energy.2014.03.103.
- WILLIAMS, E. D., WEBER, C. L. et HAWKINS, T. R., 2009. Hybrid Framework for Managing Uncertainty in Life Cycle Inventories. In : *Journal of Industrial Ecology*. 2009. Vol. 13, n° 6, p. 928-944. DOI 10.1111/j.1530-9290.2009.00170.x.
- WILSON, C. et DOWLATABADI, H., 2007. Models of Decision Making and Residential Energy Use. In : *Annual Review of Environment and Resources*. 2007. Vol. 32, n° 1, p. 169-203. DOI 10.1146/annurev.energy.32.053006.141137.
- WOLSINK, M., 2012. The research agenda on social acceptance of distributed generation in smart grids: Renewable as common pool resources. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. janvier 2012. Vol. 16, n° 1, p. 822-835. DOI 10.1016/j.rser.2011.09.006.

YÉPEZ-SALMON, G., 2013. Environmental assessment of sustainable urban projects through NEST, a tool for urban planning actors. In : [en ligne]. 2013. [Consulté le 30 juin 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.nobatek-nest.com/file/EESAP4_NEST-Publication_SP-EN.pdf.

ZABALZA BRIBIÁN, I., ARANDA USÓN, A. et SCARPELLINI, S., 2009. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. In : *Building and Environment*. décembre 2009. Vol. 44, n° 12, p. 2510-2520. DOI 10.1016/j.buildenv.2009.05.001.

ZAMAGNI, A., GUINÉE, J., HEIJUNGS, R., MASONI, P. et RAGGI, A., 2012. Lights and shadows in consequential LCA. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2012. p. 1-15. DOI 10.1007/s11367-012-0423-x.

ZELM, R. van, ROY, P.-O., HAUSCHILD, M. Z. et HUIJBREGTS, M. A. J., 2015. Acidification. In : HAUSCHILD, M. Z. et HUIJBREGTS, M. A. J. (éd.), *Life Cycle Impact Assessment* [en ligne]. S.l. : Springer Netherlands. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment. p. 163-176. [Consulté le 24 juillet 2015]. ISBN 978-94-017-9743-6. Disponible à l'adresse : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-9744-3_9.

ZHENG, M., MEINRENKEN, C. J. et LACKNER, K. S., 2015. Smart households: Dispatch strategies and economic analysis of distributed energy storage for residential peak shaving. In : *Applied Energy*. 1 juin 2015. Vol. 147, p. 246-257. DOI 10.1016/j.apenergy.2015.02.039.

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

Annexe A. Approches Economiques en ACV

Certains développements de la méthode d'analyse de cycle de vie visent à introduire des mécanismes économiques dans la représentation du système étudié ou de l'environnement technico-économique dans lequel il s'inscrit. Il existe aujourd'hui deux approches très différentes mais qui peuvent être complémentaires: l'approche dite « entrée-sortie » et l'approche conséquentielle. Nos travaux se focalisent sur la deuxième méthode, cependant il paraît important de décrire et d'expliquer brièvement les apports de la première et ses liens avec l'ACV conséquentielle.

La méthode hybride « *Environmental Input-Output Based LCA* » a été évoquée en introduction de ce texte. Elle réalise un couplage entre l'analyse du cycle de vie et les extensions environnementales des outils d'analyse économique basés sur les tableaux entrée-sorties.

Les principes de base de la méthode *Input-Output* (tableaux entrée-sortie) et ses développements hybrides de couplage avec l'ACV sont présentés succinctement dans les paragraphes suivants. Leur intérêt par rapport au sujet de cette thèse est ensuite discuté.

i. Méthode *Input-Output* (I/O) ou « entrée-sortie »

Lors de la réalisation de l'inventaire de cycle de vie en ACV, on se base sur les processus physiques censés avoir un impact significatif sur le résultat. Ceci conduit souvent à négliger l'impact des services (assurances, banques, investissement, par exemple), liés à des flux considérés comme plus monétaires que physiques.

La méthode I/O permet de prendre en compte ces impacts via l'évaluation de flux monétaires. Elle s'appuie sur les statistiques économiques de la comptabilité nationale, données disponibles pour de nombreux pays. Ceci permet de représenter sous forme de tableau le fonctionnement d'une économie, les échanges monétaires entre les secteurs (voir l'exemple très simplifié dans la figure 5).

	Industry A	Industry B	Industry C	Final demand	Total output
Industry A	Z 0	20	45	Y 35	X 100
Industry B	30	0	30	140	200
Industry C	0	80	0	70	150
Value added	V 70	100	75		
Total input	X 100	200	150		

Figure 167 : Tableau entrée-sortie, exemple simple (Source : Adapté de Damien Friot, EPFL)

Dans cette représentation de l'économie, la matrice Z représente les flux monétaires entre les différents secteurs : ses éléments z_{ij} représentent la quantité (unité monétaire) de production du secteur i utilisée par le secteur j sur une année. Les éléments x_i du vecteur X représentent la production totale (en unité monétaire) du secteur de l'économie i satisfaisant la demande finale représentée par le vecteur Y . Chaque élément y_i représente une demande finale en produits du secteur de l'économie i . Par exemple, x_1 peut représenter la production totale d'électricité et y_1 la demande finale en électricité. La classification de l'économie en secteurs peut varier d'un modèle à l'autre. A titre d'exemple, les comptes nationaux français publiés chaque année par l'Insee considère 17 secteurs, dont la construction, l'agriculture sylviculture et pêche, ou encore les industries extractives, l'énergie, l'eau, la gestion des déchets et la dépollution. Le vecteur V représente la valeur ajoutée, ses éléments v_i représentent la valeur ajoutée totale (en unité monétaire) du secteur i . On peut ensuite dériver une matrice A de flux par unité monétaire. Ses éléments a_{ij} représentent la quantité (unité monétaire) de production du secteur i nécessaire pour la production de 1 unité du secteur j . Par exemple, il faut x dollar de production du secteur métallurgique par dollar de production du secteur automobile :

$$A = Z \times \hat{X}^{-1} \quad 6-1$$

avec \hat{X} le vecteur X placé sur la diagonale d'une matrice carrée.

D'une façon similaire à la méthode ACV, on obtient alors la relation suivante :

$$X = (I - A)^{-1} \times Y = L \times Y \quad 6-2$$

où I est la matrice identité.

À partir d'une demande sur un ou plusieurs secteurs économiques, on reconstitue la génération d'activité dans l'ensemble des secteurs économiques. En fonction des données disponibles pour chaque secteur comme la consommation d'énergie du secteur, la consommation de ressources ou encore l'émission de certains polluants (gaz du protocole de Kyoto, par exemple), on peut dériver des tables d'extensions environnementale qui donnent une quantité d'émission de polluant (ou de consommation de ressource) par unité monétaire pour chaque secteur d'activité. Ces émissions peuvent ensuite être caractérisées en impacts environnementaux de façon similaire à l'ACV.

On peut intégrer dans ce formalisme les exportations et les importations avec les autres pays ou groupes de pays, pour différencier par exemple les émissions domestiques ou importées d'un pays (Hertwich et Peters, 2009). Ces outils économiques, dont l'extension environnementale a été largement développée grâce aux travaux de Leontief dans les années 1970 (Leontief, 1970), sont utilisés en économie pour évaluer par exemple les impacts d'une taxe, la dépendance

d'une économie aux importations, les changements de comportements des consommateurs...

L'intérêt de cette méthode est la grande complétude des données car tous les secteurs d'une économie sont représentés, contrairement à l'ACV où certains flux minoritaires sont négligés. Mais les tableaux économiques sont en général très agrégés, et des processus physiques de nature très différente peuvent être contenus au sein d'un même secteur (i.e. : la production d'un yaourt à la fraise et d'un steak de bœuf sont toutes deux contenues dans le secteur agro-alimentaire). De plus, les extensions environnementales recensent beaucoup moins de flux que les modèles ACV.

Pour schématiser les avantages et inconvénients entre ACV et IO : La méthode ACV donne un détail précis sur les processus impliqués mais souffre d'un défaut de complétude, à l'inverse, la méthode I/O est la plus exhaustive mais souffre d'un défaut de précision.

Afin de tirer le meilleur parti de ces deux méthodes, des combinaisons des deux ont été développées, comme l'ACV hybride. Ces méthodes ont été peu utilisées dans le secteur de la construction. Pourtant, elles participeraient à une meilleure prise en compte des impacts, notamment concernant la phase de construction des bâtiments. Une analyse de Nassen et al. (Nässén et al., 2007) sur les études IO et ACV montre des impacts bien plus importants dans les études IO. Les différences seraient en partie dues au périmètre restreint des études ACV conduisant par exemple à une sous-estimation de l'énergie totale utilisée pour la construction des bâtiments.

Plusieurs variantes de ces méthodes hybrides ont été développées ; deux sont explicitées dans les paragraphes suivants. La figure 6, extrait de Suh et al. (Suh et al., 2004), présente les avantages et inconvénients de différentes méthodes hybrides.

TABLE 1. Comparison between Hybrid Approaches

approach	strengths	weaknesses	methodological reference	case studies
tiered hybrid	easy to use	problem of double counting	Bullard et al. (34)	Moriguchi et al. (12), Marheineke et al. (38), Hondo et al. (48), Munksgaard et al. (42, 47)
input-output based hybrid	literatures, databases and case studies well documented avoid double counting	recurring flows are not properly described by process-flow diagram approach use and end-of-life phase are externally added to the main system	Joshi (43)	Joshi (43)
integrated hybrid	process part and input-output part are described in a consistent framework consistent mathematical framework for the whole life-cycle avoid double counting. easy to apply analytical tools	recurring flows between the main system and use and end-of-life phase are not properly described should be combined with other methods if the national economy is highly dependent upon imports relatively complex to use high data and time requirements	Suh (18)	Suh and Huppes (53), Suh (53)

Figure 168 : Approches Hybrides, Comparaison (Source : Suh 2004)

ii. ACV Hybride

Une première approche consiste à adjoindre à la matrice ACV représentant le système (avant- et arrière-plan), une matrice entrée-sortie représentant l'arrière-plan « étendu » ou « arrière-plan IO ». On dérive ainsi la matrice A suivante qui remplace la matrice A « ACV » :

$$A = \begin{pmatrix} A_{ff} & 0 & 0 \\ A_{pf} & A_{pp} & 0 \\ A_{nf} & 0 & A_{nn} \end{pmatrix} \quad 6-3$$

où A_{ff} représente le système d'avant-plan de l'ACV (le système étudié), A_{pp} le système d'arrière-plan ACV, A_{nn} le système d'arrière-plan IO (la matrice A présentée au paragraphe précédent), A_{nf} la demande du système étudié sur l'arrière-plan ACV, A_{pf} la demande du système étudié sur l'arrière-plan IO.

Cette méthode est relativement simple d'utilisation et nécessite seulement une modification de la matrice A_{nf} pour éviter un double comptage des émissions déjà évaluées par la matrice de premier plan A_{ff} .

Elle est valide dans la mesure où les flux liés au système étudié sont négligeables par rapport aux flux économiques totaux. Si ce n'est pas le cas, il faut utiliser des méthodes plus complexes comme la méthode intégrée, présentée au paragraphe suivant.

iii. Méthode intégrée

Les développements de Suh (2004) sont considérés comme les plus aboutis dans ce type de méthode. Malheureusement, ils demandent une quantité de données importante, ce qui peut limiter leur application. Cette approche est particulièrement utile lorsque le système d'avant plan est suffisamment important

pour ne plus être considéré comme négligeable vis-à-vis du système d'arrière-plan .

Dans cette méthode, il faut revenir à la matrice des flux entre secteurs, la matrice Z présentée plus haut, ici représentée par la matrice Z_{bb} . L'élément $Z_{bb}(i,j)$ représente la quantité (unité monétaire) de produit du secteur i utilisé par le secteur j . Les données de cette matrice sont extraites des comptes nationaux et sont obtenues via les offices statistiques des pays, comme l'Insee en France.

A cette matrice Z_{bb} , on associe une matrice de flux physiques représentant le système étudié (Z_{ff}), une matrice (Z_{bf}) de flux monétaires du système d'arrière-plan (Z_{bb}) vers le système étudié (Z_{ff}) et la matrice complémentaire (Z_{fb}) de flux physiques du système d'arrière-plan vers le système étudié.

On ne considère plus ici d'arrière-plan ACV, mais seulement l'arrière-plan IO (Z_{bb}). Celui-ci doit alors être réajusté pour lui soustraire les flux contenus dans la matrice représentant le système étudié Z_{ff} . Ceci évite un double comptage dans la mesure où les flux liés au système étudié ne peuvent pas être considérés comme négligeables par rapport à l'économie. Il faut au préalable convertir les données de Z_{ff} et Z_{fb} en unités monétaires (ce sont des flux physiques) grâce à des vecteurs de prix. La taille des matrices Z_{ff} , Z_{fb} et Z_{bf} doit être ensuite ajustée à Z_{bb} en utilisant des matrices de correspondances. Puis, on soustrait les flux ACV ainsi modifiés à Z_{bb} .

$$\tilde{Z} = \begin{pmatrix} Z_{ff} & Z_{fb} \\ Z_{bf} & \tilde{Z}_{bb} \end{pmatrix} \text{ et } \tilde{X} = \begin{pmatrix} x_f \\ \tilde{x}_b \end{pmatrix} \quad 6-4$$

Avec \tilde{Z}_{bb} la matrice des flux monétaires réajustée et \tilde{X} le vecteur sortie réajusté.

De la matrice \tilde{Z} présentée ci-dessus, on dérive ensuite la matrice A puis la matrice L nécessaire pour la suite de l'étude, sachant que le vecteur \tilde{x}_b (exprimé en unité monétaire) doit également être corrigé des flux contenus dans x_f (exprimé en unité physique).

iv. Liens entre approches *Input-Output* et conséquentielle

L'utilisation des méthodes hybrides ou *input-output* est compatible avec l'utilisation de l'ACV conséquentielle. De façon analogue à l'ACV dynamique présentée précédemment, les tableaux économiques apportent un surplus d'information et viennent compléter ou préciser l'analyse de cycle de vie. Ils permettent de mieux gérer les sources d'incertitudes, comme présenté par Williams et al. (2009).

En effet, l'introduction des tableaux économiques porte sur la matrice technologique A , qui devient plus exhaustive dans sa représentation du système technico-économique considéré. La prise en compte de mécanismes économiques à proprement parler comme l'effet rebond, la non-disponibilité

d'une technologie (coût, contrainte en ressource), peut être introduite en parallèle via des modèles d'équilibre partiel, des discussions avec des experts du secteur concerné, des modélisations économiques annexes qui ne sont pas directement liées à la représentation figée des tableaux entrées-sorties (Plevin et al. 2014).

Les méthodes Input-Output ou hybrides ont déjà été testées sur des cas d'études de bâtiment, en particulier pour aider à la modélisation de la phase de construction (Crawford et al., 2006 ; Nässén et al., 2007) ou plus spécifiquement sur des matériaux de construction (Omar et al., 2014). Ces méthodes ont également été utilisées pour évaluer les technologies de génération d'électricité, même si peu d'études sont disponibles aujourd'hui dans la littérature (Turconi et al. 2013). L'utilisation de ces méthodes peut parfois avoir un impact important sur les résultats : dans le cas de la production nucléaire, les émissions de gaz à effet de serre peuvent être de 10 à 20 fois plus élevées dans les études utilisant les outils IO (Sovacool 2008 ; Turconi et al. 2013).

Annexe B. Recyclage des matériaux de construction, Polster 1995

Pour réduire la quantité de matières premières nécessaire à la fabrication d'un bâtiment et celle mise en décharge après la démolition, les solutions architecturales faisant appel aux matériaux et composants recyclés et permettant leur recyclage en fin de vie doivent être favorisées. Nous définissons de ce fait les exigences suivantes auxquelles le modèle du recyclage doit se conformer :

1. il doit récompenser le recyclage au début et en fin de cycle de vie d'un bâtiment ;
2. il doit éviter le déplacement de la pollution en dehors d'un bâtiment.

Nous avons décidé de permettre l'utilisation des moyennes statistiques pour un composant particulier¹²⁶. Par exemple, si 50 % des fenêtres sont réutilisées alors l'impact moyen d'une fenêtre particulière sera calculé comme la moyenne entre l'impact d'une fenêtre neuve et celui d'une fenêtre réutilisée, même si cela ne correspond pas à la réalité physique. Après la démolition d'un bâtiment, un certain pourcentage des fenêtres peut être restauré et réutilisé dans un autre bâtiment. Ainsi, la possibilité de ne démonter qu'une partie dans ses constituants initiaux est incluse dans la description d'un composant. En conséquence, pour un constituant donné, la quantité utilisée durant la fabrication d'un composant peut être différente de celle obtenue après le démontage du composant. Il est donc nécessaire de distinguer les calculs des inventaires pour a) la fabrication et b) le traitement après usage.

Une récupération des matériaux pour les recycler n'est possible que si l'étape de démolition se fait sous forme d'une déconstruction sélective nécessitant une quantité plus élevée d'énergie par rapport à la démolition standard. Pour récompenser ces efforts et cette stratégie de prévention des impacts futurs, nous préconisons de distribuer l'impact évité de recyclage différemment. L'approche pour le recyclage en boucle fermée est développée ci-après.

- Le recyclage en boucle fermée

L'effet positif du recyclage, considéré comme impact négatif ou impact évité, peut être exprimé de la manière suivante pour une partie recyclée r :

$$r \times (I_r - I_n) \quad 6-5$$

Le recyclage peut avoir lieu en début et à la fin du cycle de vie, mais il ne faut compter qu'une seule fois l'effet positif, car il doit être reparté entre le

¹²⁶ Un composant contient plusieurs matériaux.

bâtiment étudié, le bâtiment d'où provient le matériau recyclé et celui où il sera mis en œuvre. Par conséquent, il ne peut être compté qu'une seule fois si on veut éviter, selon notre deuxième exigence, le déplacement de la pollution en dehors du système d'un bâtiment.

Suite à notre première exigence, nous avons décidé de partager à parts égales l'impact évité entre les deux phases concernées. De ce fait, les équations suivantes sont appliquées à la phase de construction et au traitement après usage :

$$I_f = I_n + \left(\frac{r_f}{2}\right) \times (I_r - I_n) \quad 6-6$$

$$I_t = i \times I_i + d \times I_d + \left(\frac{r_t}{2}\right) \times (I_r - I_n) \quad 6-7$$

On rappelle que : $i + d + r_t = 1$.

Le nombre de cycle est en général limité, même pour un recyclage en boucle fermée. Si n est le nombre maximal de cycle de recyclage, le taux maximal de recyclage r_m est $n/(n+1)$. Ce taux maximal est le complément à 1 du taux minimal de renouvellement de matière durant un cycle, égal à $1/(n+1)$. L'existence de ce taux minimal, quand n est un nombre fini, provient du fait qu'il est impossible de recycler la totalité d'un matériau en fin de vie. Ainsi, une partie de celui-ci est mise en décharge ou incinérée. Pour avoir la même quantité de ce type de matériau dans un nouveau cycle il est nécessaire d'ajouter de la matière neuve en début du cycle, à proportion du taux minimal de renouvellement de matière. Ce taux exprime la faisabilité technique en matière de recyclage d'un matériau et il doit être respecté dans un cas réel. Nous le vérifions par l'inégalité suivante :

$$(r_f + r_t)/2 \leq n/(n + 1) \quad 6-8$$

Elle signifie que si le taux moyen de recyclage pour un matériau du bâtiment en étude dépasse r_m il y aura un déplacement de la pollution vers les bâtiments "en amont" ou "en aval".

Par exemple, si $r_f = r_t = 1$ avec un nombre fini de recyclage possible et en cas d'équivalence de quantités au début et en fin de cycle de vie, il n'y aurait d'après les équations 2 et 3 qu'un impact de recyclage mais pas d'impact de fabrication, ni d'incinération, ni de mise en décharge. Or, puisque le nombre de cycles est limité, il faut soit de temps en temps fabriquer entièrement la quantité du matériau et le gérer en tant que déchets soit ajouter une partie neuve durant chaque cycle ce que nous considérons. Les impacts correspondants de la fabrication, de l'incinération et de la mise en décharge seront alors affectés aux bâtiments en amont et en aval, ce qui représente un déplacement de la pollution.

Ce déplacement possible de la pollution n'étant pas considéré dans l'approche classique, nous l'évitons par une imputation des impacts appropriés au bâtiment étudié. Ceci répond à notre deuxième exigence.

Si la condition posée par l'inégalité 4 n'est pas respectée, il faut ajouter un terme correctif. Ce terme est ajouté à l'inventaire de construction (équation 2) car nous considérons qu'il doit s'appliquer à la quantité totale d'un matériau. Il dépend de la somme des taux d'incinération et de mise en décharge, de la façon suivante :

si $i + d > 0$, le terme correctif est égal à :

$$\left[(r_f + r_t)/2 - n/(n+1) \right] \times [I_n + (i \times I_i + d \times I_d)/(i + d)] \quad 6-9$$

si $i + d = 0$, il est égal à :

$$\left[(r_f + r_t)/2 - n/(n+1) \right] \times [I_n + (i \times I_i + d \times I_d)/2] \quad 6-10$$

Le terme correctif représente l'impact de fabrication et du traitement après usage de la partie recyclée d'un matériau dépassant le taux maximal de recyclage. L'impact supplémentaire du traitement des déchets ultimes est pondéré, si possible, avec les taux i et d .

- La réutilisation

Il a déjà été exposé que la réutilisation est traitée comme le recyclage en boucle fermée. Par conséquent, nous ne présentons ici que les équations qui s'appliquent dans le cas où il y a à la fois recyclage en boucle fermée et réutilisation. Les équations pour la phase de fabrication et de traitement après usage sont les suivantes :

$$I_f = I_n + \left(r_f/2 \right) \times (I_r - I_n) + \left(u_f/2 \right) \times (I_u - I_n) \quad 6-11$$

$$\text{avec : } r_f + u_f \leq 1$$

$$I_t = i \times I_i + d \times I_d + \left(r_t/2 \right) \times (I_r - I_n) + \left(u_t/2 \right) \times (I_u - I_n) \quad 6-12$$

$$\text{avec : } i + d + r_t + u_t = 1$$

Le taux de réutilisation durant la fabrication est exprimé par u_f et celui pour le traitement après usage par u_t . L'inventaire du procédé de réutilisation est représenté par I_u .

La condition à respecter pour éviter le déplacement de la pollution s'écrit de la manière suivante avec t le nombre maximal de cycle de réutilisation possible :

$$r_f + u_f + r_t + u_t/2 \leq (n + t)/(n + t + 1) \quad 6-13$$

Si la condition (9) n'est pas respectée, le terme suivant doit être joint à l'équation (7), en dépendant des taux d'incinération et de mise en décharge :

si $i + d > 0$, il est égal à :

$$[r_f + u_f + r_t + u_t/2 - (n + t)/(n + t + 1)] \times [I_n + (i \times I_i + d \times I_d)/(i + d)] \quad 6-14$$

si $i + d = 0$, il est égal à :

$$[r_f + u_f + r_t + u_t/2 - (n + t)/(n + t + 1)] \times [I_n + (i \times I_i + d \times I_d)/2] \quad 6-15$$

L'introduction de la contrainte sur le taux maximal de recyclage pourrait dans certains cas spécifiques de la réutilisation affecter plus d'impacts à un bâtiment qu'il en induit en réalité. On peut mettre en évidence ce fait par un exemple extrême mais très illustré. Considérons trois bâtiments construits successivement chacun après la fin de vie du précédent. Des tuiles neuves sont utilisées dans le premier bâtiment et elles sont réutilisées dans les deux bâtiments suivants. Elles sont mises en décharge après la démolition du troisième bâtiment. Nous supposons que le nombre maximal de cycle de réutilisation est 2. La contrainte posée est assurée pour le premier bâtiment :

$$(r_f + r_t)/2 = (0+1)/2 = 0.5 \leq 0.6666 = 2/(2+1) = n/(n+1)$$

et le dernier bâtiment :

$$(r_f + r_t)/2 = (1+0)/2 = 0.5 \leq 0.6666 = 2/(2+1) = n/(n+1)$$

Mais elle n'est pas assurée pour le deuxième bâtiment :

$$(r_f + r_t)/2 = (1+1)/2 = 1 > 0.6666 = 2/(2+1) = n/(n+1)$$

Par conséquent, on lui attribuerait, et seulement à lui, le terme correctif. Ce dernier représente un impact surnuméraire car tous les impacts dus à la fabrication, la réutilisation et la mise en décharge des tuiles sont déjà attribués aux trois bâtiments. Par conséquent, pour éviter qu'un impact soit compté en trop la contrainte n'est pas appliquée dans le cas où un matériau peut être réutilisé en fin de vie du bâtiment si sa durée de vie dépasse la durée de vie du bâtiment, multiplié par le nombre maximal de cycles de réutilisation.

- Le recyclage en boucle ouverte

Dans le cas du recyclage en boucle fermée, les procédés de fabrication neuve et du recyclage sont les mêmes pour les phases de la fabrication d'un matériau et de son traitement après usage. De ce fait, les inventaires I_r et I_n ne changent pas pour les deux phases. Par contre, dans le cas du recyclage en boucle ouverte, ces procédés sont différents pour les deux phases.

La même démarche que pour le recyclage en boucle fermée est appliquée. L'impact évité de recyclage est réparti à parts égales à la phase d'utilisation et à celle du traitement après usage. A cause des différences de procédés pour les deux phases, on n'applique que l'équation (2) telle quelle pour la fabrication d'un matériau de construction. Dans cette équation, le procédé de

recyclage d'un produit devenant après recyclage en boucle ouverte un matériau de construction est représenté par l'inventaire I_r .

Pour le traitement après usage on utilise l'équation suivante :

$$I_t = i \times I_i + d \times I_d + (T^t/2) \times (I'_r - I'_n) \quad 6-16$$

Dans l'équation (12), I'_r caractérise le recyclage en boucle ouverte d'un matériau de construction vers un autre produit (pour une autre application). L'inventaire I'_n décrit dans ce cas le procédé de fabrication neuve du produit remplacé par le matériau de construction recyclé.

Pour le recyclage en boucle ouverte, aucun taux maximal de recyclage théorique ne peut être défini. Par conséquent, aucune condition n'est formulée. Cependant, le taux de recyclage pour ce type de recyclage peut être limité par des applications en aval ou par la production en amont, mais nous n'avons pas tenu compte de ces aspects dans notre travail.

On peut citer pour le premier cas le recyclage des menuiseries PVC des fenêtres. Leur quantité totale recyclable (secteur du bâtiment) pourrait dépasser les applications possibles du PVC recyclé. La production du gypse dans une unité de lessivage des fumées¹²⁷ d'une centrale thermique est un exemple pour le deuxième cas. La quantité produite pourrait être inférieure par rapport à la quantité utilisable dans le secteur du bâtiment.

S'il y a recyclage en boucle ouverte au niveau de la fabrication d'un matériau et recyclage en boucle fermée pour son traitement après usage, ou vice versa, nous traitons chaque phase avec les approches appropriées. Une vérification de l'inégalité (4) n'est pas nécessaire, car elle est toujours assurée. En effet, l'un de deux taux r_f ou r_t est nul du fait que le taux du recyclage en boucle ouverte n'intervient pas, en conséquence :

$$(r_f + r_t)/2 \leq 1/2$$

D'autre part n est toujours supérieur ou égal à 1 et en conséquence :

$$n/(n+1) \geq 1/2$$

Donc, l'inégalité (6) est vérifiée dans ce cas.

Si le recyclage en boucle ouverte et en boucle fermée coexistent pour une phase, on applique l'équation (2), élargie par des termes pour le recyclage en boucle fermée, pour la phase de fabrication. Pour le traitement après usage, on utilise l'équation (3) plus le dernier terme de l'équation (12). La condition (4) doit être vérifiée pour la partie concernant le recyclage en boucle fermée. De

¹²⁷ Pour être utilisable dans le bâtiment, ce gypse ne devrait pas contenir une concentration élevée de métaux lourds et d'autres éléments chimiques, suspectés d'être émis durant l'utilisation d'un bâtiment.

même, si la condition n'est pas respectée, le terme correctif (5) ou (6) (selon le cas) est ajouté à l'équation pour la phase de fabrication.

Discussion critique de l'approche développée

Des comparaisons entre l'approche classique et l'approche développée montrent des différences non négligeables entre les deux approches. Ces différences sont nulles si les pourcentages de recyclage en début et en fin de vie d'un matériau et ses quantités sont les mêmes. Par contre, elles sont très fortes dans le cas où il y a de grandes différences entre les taux de recyclage en début et en fin de vie.

On constate que l'approche développée est conforme aux exigences de départ. Elle évite, au moins pour le recyclage en boucle fermée, le déplacement de la pollution en dehors du bâtiment étudié. Elle ne donne pas de bonus mais son principe permet une évaluation simple et rigoureuse de l'impact évité.

Puisque la réalité est toujours plus complexe qu'un modèle simple, l'approche a aussi ses limites. Elle ne prévoit pas de tenir compte d'une manière appropriée, du cas du recyclage en début de cycle de vie d'un bâtiment d'un produit A qui provient d'un autre procédé où elle est créée comme déchet inévitable et en quantité abondante et qui remplace un matériau B. Un exemple est le gypse issu d'une unité de lessivage des fumées dans un contexte où la fabrication d'électricité est essentiellement assurée par des centrales utilisant des combustibles fossiles. Dans ce cas, seul la création de gypse pour le lessivage des fumées devrait être compté et pas la fabrication du gypse remplacé. Dans l'application de la méthode, ce problème peut être résolu en définissant comme inventaire de fabrication le même que pour le recyclage.

La principale critique de l'approche développée porte sur le fait que la durée de vie d'un bâtiment est très longue et qu'il est impossible de prévoir durant sa conception ou sa construction quelles seront les techniques utilisées pour sa démolition ou sa déconstruction et les taux des matériaux recyclés. De ce fait, les impacts du recyclage réels ne pourraient pas être déterminés. Cette critique, venant de l'approche classique, néglige que des pourcentages sont donnés dans l'approche classique pour la mise en décharge et l'incinération. On ignore, comme pour le recyclage, quelles seront les techniques d'incinération ou de mise en décharge au moment de la démolition ou déconstruction d'un bâtiment ainsi que leurs impacts sur l'environnement.

Un avantage de cette approche est qu'elle incite les décideurs à réfléchir dès la conception d'un bâtiment sur la possibilité de recycler les matériaux en fin de vie. De ce fait, s'ils veulent bénéficier de la gratification des impacts évités en fin de vie, ils devront écarter les solutions techniques qui ne sont actuellement pas recyclables, comme des cloisons où plusieurs composants sont collés ensemble.

Cela ne peut que contribuer à mettre en évidence la responsabilité que les bâtisseurs actuels ont envers les générations futures qui seront obligées de s'occuper du traitement ultime des constructions actuelles.

Annexe C. Pondération des stations météorologique RTE

(*) **Tableau des 32 stations météorologiques retenues par RTE et des pondérations associées dans le calcul de l'indice national de température :**

Station météorologique	Poids associés	Station météorologique	Poids associés
ABBEVILLE	1,00%	NANCY-ESSEY	3,00%
BALE-MULHOUSE	2,00%	NANTES	4,20%
BORDEAUX	4,00%	NEVERS	1,50%
BOULOGNE-SUR-MER	1,00%	NICE	3,60%
BOURGES	4,20%	NIMES-COURBESSAC	2,40%
BOURG-ST-MAURICE	2,75%	ORANGE	1,20%
BREST-GUIPAVAS	4,20%	PARIS-MONTSOURIS	11,25%
CAEN	2,50%	PERPIGNAN	1,60%
CLERMONT-FERRAND	2,75%	RENNES	4,20%
DIJON	1,00%	ST-AUBAN	1,20%
LE LUC	1,20%	STRASBOURG	1,00%
LILLE	3,00%	TARBES-OSSUNS	4,00%
LIMOGES-BELLEGARDE	3,20%	TOULOUSE-BLAGNAC	1,60%
LYON-ST-EXUPERY	5,50%	TOURS	4,20%
MARSEILLE-MARIGNANE	2,40%	TRAPPES	11,25%
MONTPELLIER	1,60%	TROYES	1,50%

Figure 169 : Stations utilisées par RTE pour le calcul de la température nationale, source RTE

Annexe D. Détermination du gradient

La température utilisée pour la détermination du gradient à l'heure h est une moyenne glissante effectuée sur h et les 71 heures précédentes (soit trois jours) afin de tenir compte de l'inertie du système au changement de température.

Pour chaque heure de l'année, pour les températures inférieures à 15°C, on cherche la pente de la courbe de tendance donnant la consommation en fonction de la température.

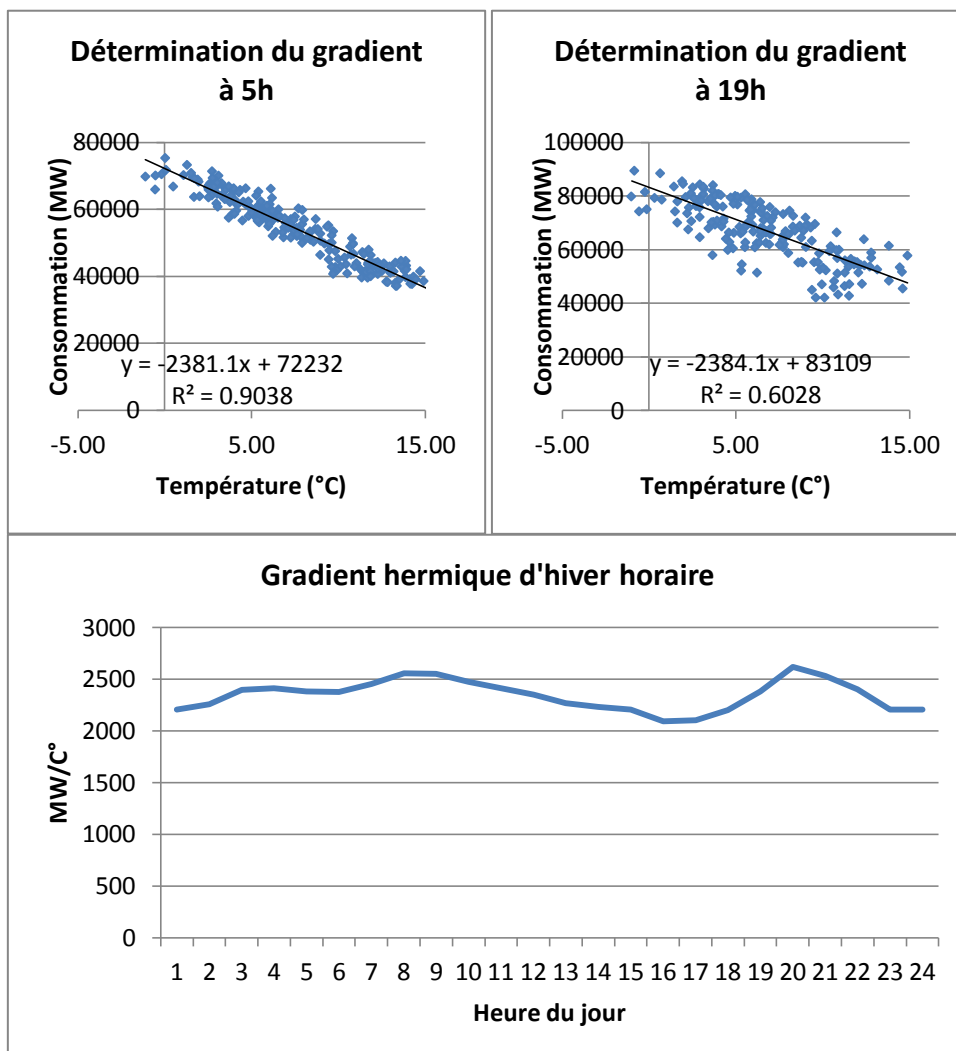


Figure 170 : Détermination du gradient

Annexe E. Calcul des coefficients de modulation de la consommation nationale

L'ensemble des coefficients de modulation de la consommation nationale sont des coefficients sans unités permettant de moduler la puissance de base C_{base} . Les coefficients γ sont évalués pour chaque saison, chaque jour de la semaine et chaque heure de la journée. Leur moyenne sur la journée vaut 1.

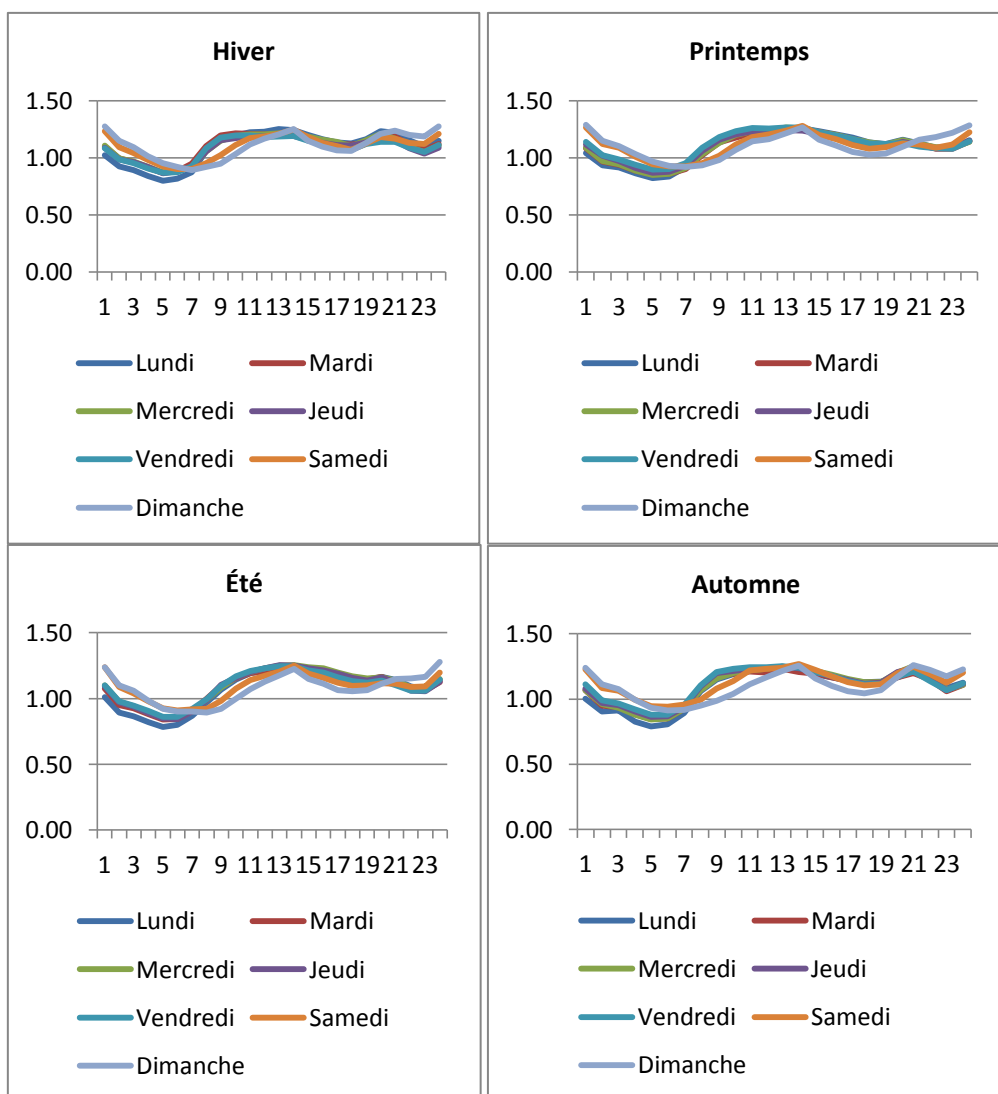


Figure 171: Coefficients de modulation de la consommation nationale d'électricité

Les coefficients β sont évalués pour chaque jour de la semaine et permettent de tenir compte des variations d'activité économique entre les jours de la semaine. Leur moyenne vaut 1.

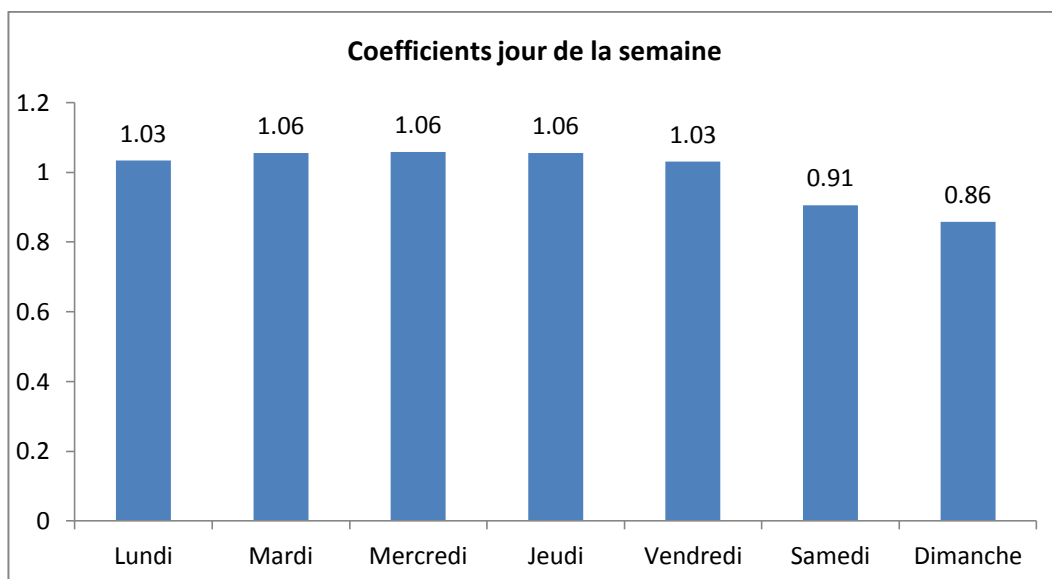


Figure 172 : Coefficients de modulation de la consommation nationale sur les jours de la semaine

Les coefficients α sont évalués pour chaque mois de l'année et permettent de tenir compte des variations d'activité économique et de la consommation des autres secteurs économiques. Leur moyenne vaut 1.

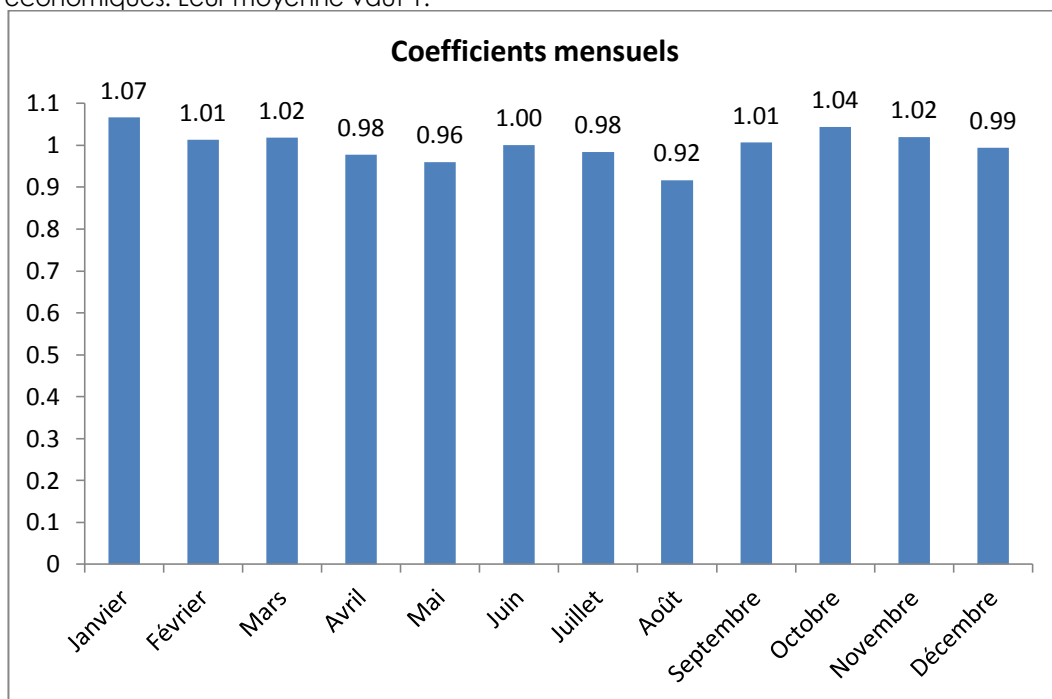


Figure 173 : Coefficients de modulation de la consommation nationale sur les mois de l'année

Annexe F. Étude des données météorologiques RT2012

Exemple de la station de Trappes.

Les températures moyennes mensuelles, (moyenne, moyenne des maximums et moyenne des minimums) de la station de Trappes (période 1981-2010) ont été comparées aux données fournies par la réglementation thermique 2012 pour la même station (H1A, Trappes). La période de référence de calcul pour les données RT est 1994-2008 et les données ont été calculées selon la norme NF EN ISO 15927-4. Les résultats sont présentés sur la Figure 174.

Par rapport aux moyennes historiques, les températures conventionnelles de la RT2012 semblent être surévaluées en hiver de 0,2 à 1,4°C. L'hypothèse d'une prise en compte du réchauffement climatique dans les données RT peut être faite, cependant celle-ci devrait avoir pour conséquence une augmentation conséquente des températures maximales d'été, ce qui n'est pas le cas.

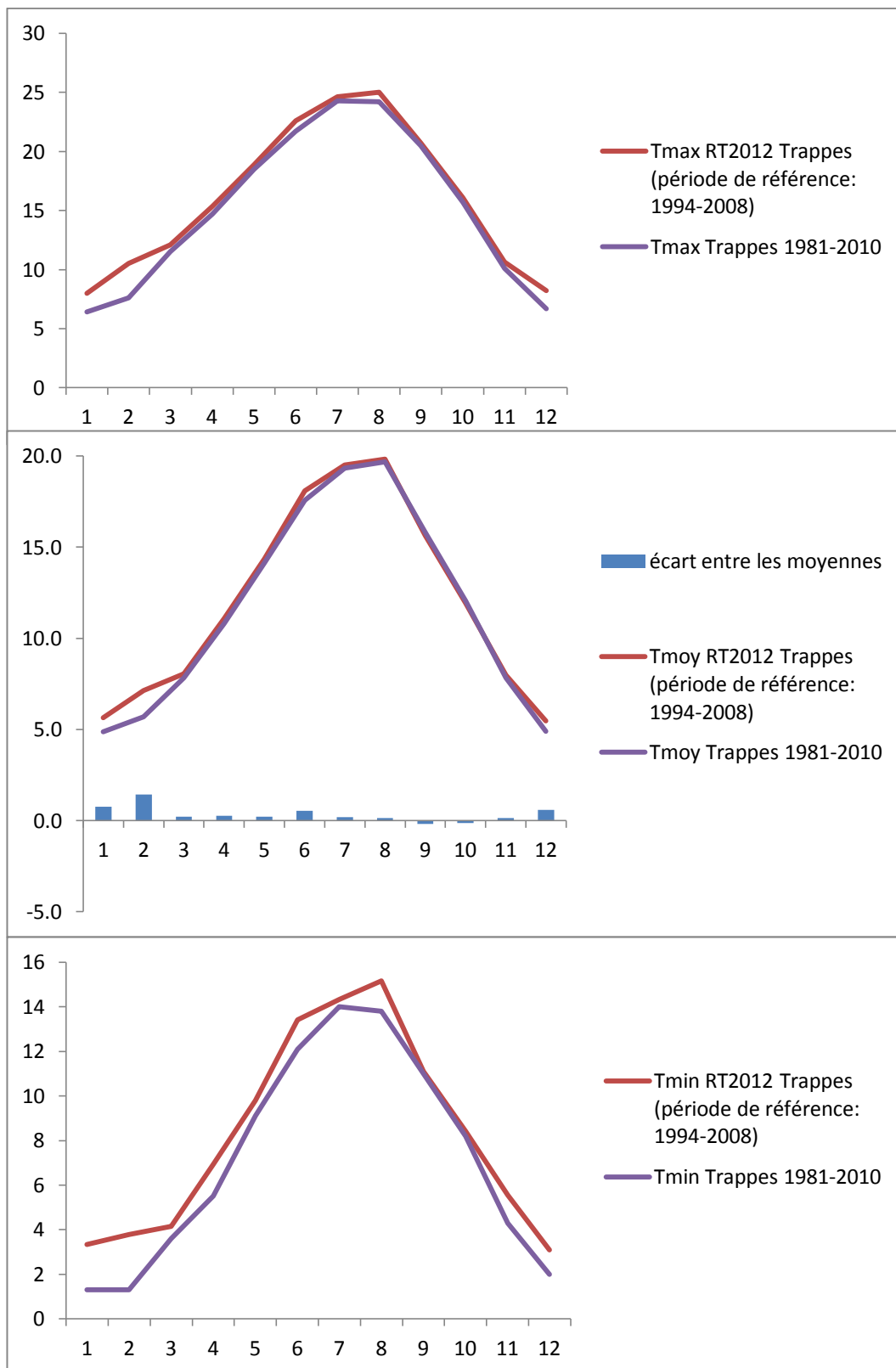


Figure 174 : Moyenne des maximums, des moyennes et des minimums des températures journalières, par mois, selon la RT2012 ou selon les données historiques de Météo-France, pour la station de Trappes.

Annexe G. Capacités installées prévues pour 2014

Source : Bilan Prévisionnel RTE, actualisation de 2013, p. 32

Actualisation 2013 de l'offre totale en France à l'horizon 2018

GW	01/01/2013	2014	2015	2016	2017	2018
Nucléaire	63,1	63,1	63,1	64,7	62,9	62,9
<i>Rappel Bilan prévisionnel 2012</i>		63,1	63,1	64,7	62,9	–
Charbon	6,8	5,2	3,7	2,9	2,9	2,9
<i>Rappel Bilan prévisionnel 2012</i>		4,7	3,5	2,9	2,9	–
Cycles combinés au gaz	5,2	5,2	5,2	5,7	6,6	6,6
<i>Rappel Bilan prévisionnel 2012</i>		6,0	6,0	6,5	6,9	–
Fioul et turbines à combustion	7,0	7,0	7,0	3,2	3,2	3,2
<i>Rappel Bilan prévisionnel 2012</i>		7,0	7,0	3,1	3,1	–
Thermique décentralisé non EnR*	6,5	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
<i>Rappel Bilan prévisionnel 2012</i>		4,8	4,7	4,7	4,6	–
Thermique décentralisé EnR	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0
<i>Rappel Bilan prévisionnel 2012</i>		1,6	1,7	1,7	1,8	–
Hydroélectricité (turbinage)	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2
<i>Rappel Bilan prévisionnel 2012</i>		25,2	25,2	25,2	25,2	–
Éolien	7,4	9,0	9,8	10,6	11,4	12,2
<i>Rappel Bilan prévisionnel 2012</i>		8,9	9,7	10,5	11,5	–
Photovoltaïque	3,5	5,1	5,9	6,7	7,5	8,3
<i>Rappel Bilan prévisionnel 2012</i>		4,1	4,6	5,1	5,6	–
Effacements de consommation**	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
<i>Rappel Bilan prévisionnel 2012</i>		3,0	3,0	3,0	3,0	–

* Sur ces puissances installées, seule une part réduite (de l'ordre de la moitié) est effectivement disponible.

**Au 1^{er} janvier 2013 : effacements cumulables connus de RTE.

Annexe H. Construction de la courbe d'usage pour l'hydraulique de lac

Pour déterminer la variation du productible hydraulique modulable disponible au cours de l'année, on fait l'hypothèse que ce productible est lié à la partie variable de la production hydraulique sur la journée.

Pour l'ensemble des années 2008 à 2014, on extrait la partie variable de la production hydraulique en retranchant de la production totale le minimum glissant sur 24 h consécutives. Un exemple est présenté sur la Figure 175 et la Figure 176 pour les deux années extrêmes 2011 (production hydraulique la plus basse) et 2013 (production hydraulique la plus haute). Pour les années bissextiles, le 29 Février est exclu.

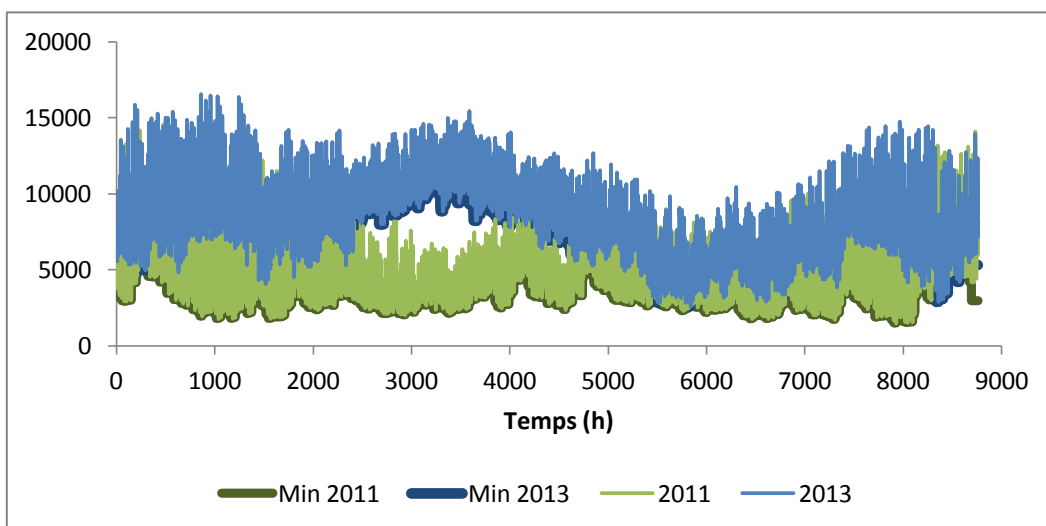


Figure 175 : Minimum journalier de production hydraulique

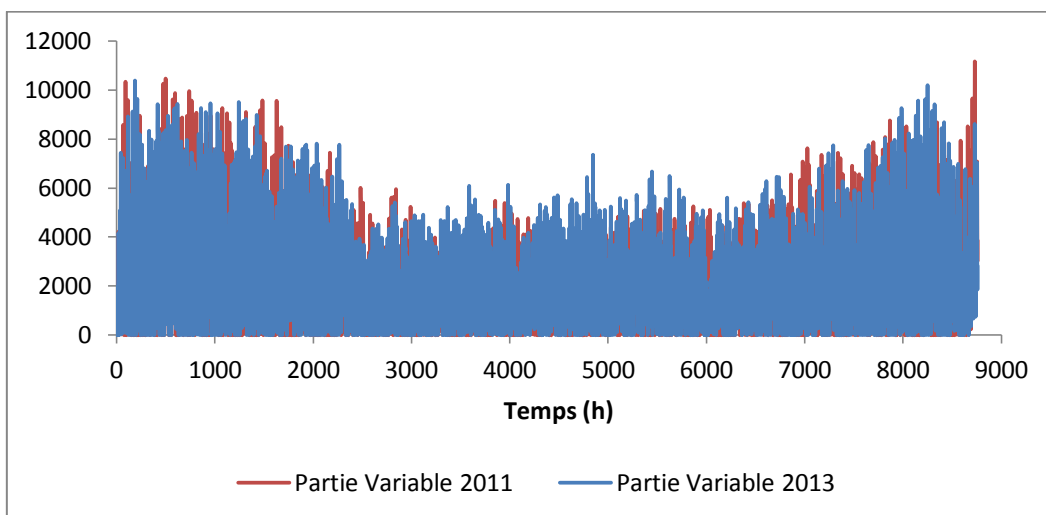


Figure 176: Extraction de la partie variable de la production hydraulique

Le productible disponible pour l'hydraulique de lac est une quantité d'énergie mobilisable « à volonté » sous réserve de respecter les contraintes de puissance des centrales. Pour représenter ce volume d'énergie disponible, on réalise pour l'ensemble des années disponibles, la somme glissante hebdomadaire (sur 168 heures) de la partie variable précédemment calculée. Cette somme d'énergie disponible hebdomadaire est ensuite moyennée sur l'ensemble des années, comme illustré sur la Figure 177.

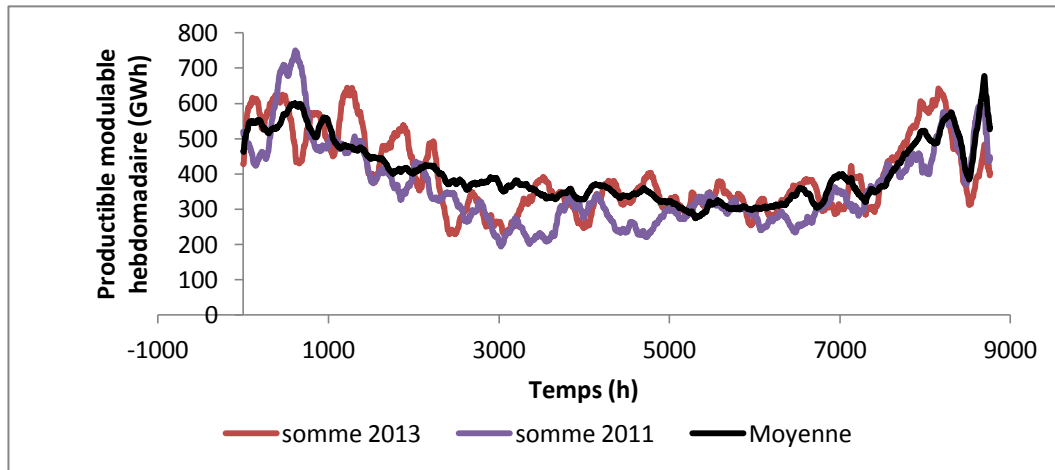


Figure 177 : Calcul du productible modulable hebdomadaire moyen

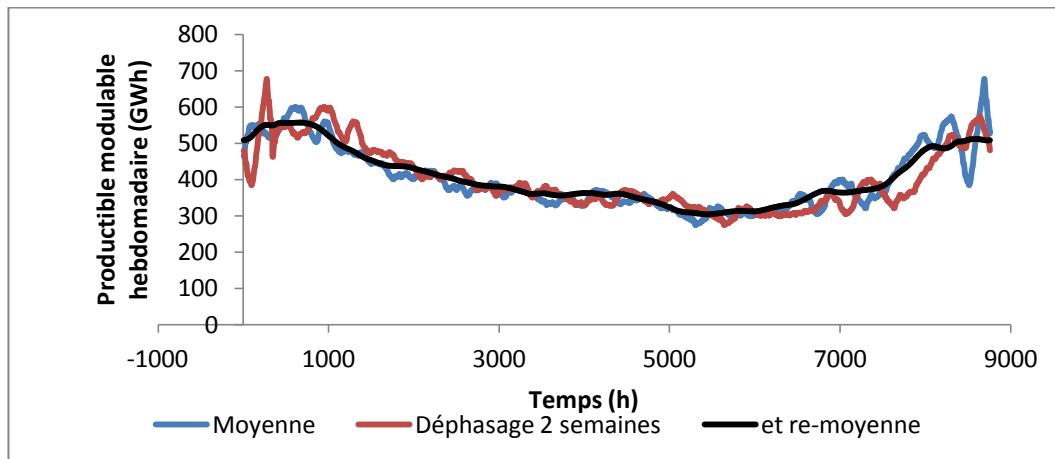


Figure 178 : Prise en compte du déphasage et lissage du productible hebdomadaire moyen

Ce productible modulable est ensuite normalisé pour obtenir une courbe d'usage dont la moyenne sur l'année est égale à 1, ce qui permet de considérer une variation du productible annuel à la hausse (nouvelle installation, rénovation de l'existant) ou à la baisse (baisse des ressources en eau).

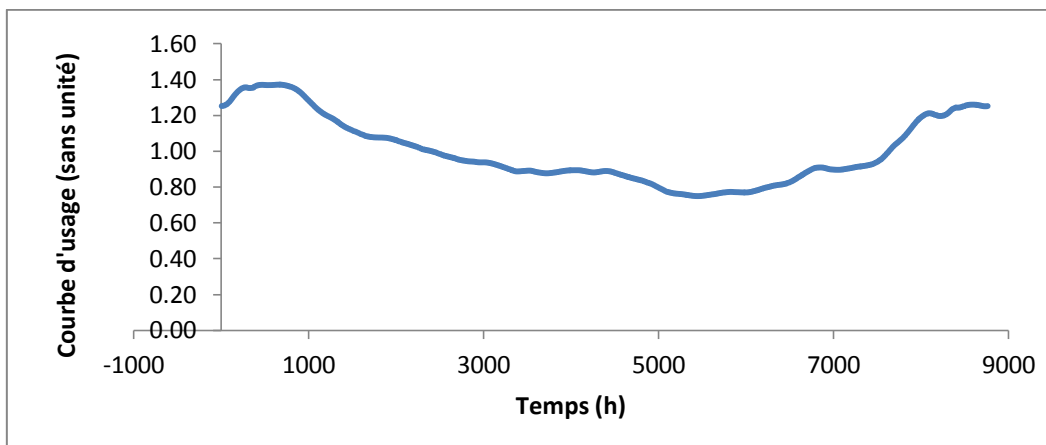


Figure 179 : Courbe d'usage pour l'hydraulique de lac

Annexe I. Observation de la production historique

Les paramètres caractéristiques des technologies modulables (contraintes de rampe, minimum ou maximum de production) sont en partie issus des observations de la production réelle sur 2013.

Les figures ci-dessous montrent la variation de production nucléaire et hydraulique en 2013, exprimé en pourcentage de la capacité disponible. A partir de ces observations, on fixe la variation à la hausse de production du nucléaire à 4,2 % maximum (et 4,5 % à la baisse) de la capacité disponible et la variation de production de l'hydraulique à resp. 16,2 % et 19,6 % maximum.

Cependant, cette borne sur le nucléaire représente en quelque sorte un optimum économique mais introduit des problèmes de stabilité du système, notamment lorsque la demande en électricité est très basse. Le nucléaire peut alors fortement baisser sa production, ce qui est nécessaire, mais pas économiquement intéressant. Afin de garantir la stabilité du système de production, les bornes de variation du nucléaire sont portées au maximum observé : 9 % à la hausse et 12 % à la baisse.

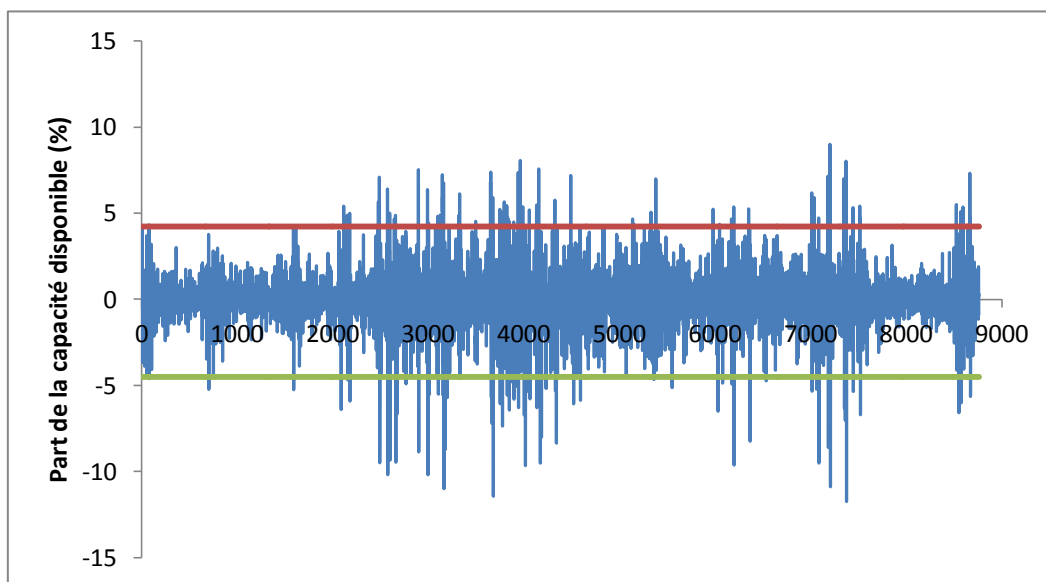


Figure 180 : Variation horaire de la production nucléaire en 2013 (en % de la capacité disponible) et variations maximale à la hausse (rouge) et à la baisse (vert) de production fixées dans le modèle

Pour fixer les bornes maximum et minimum de production des différentes technologies, on considère ce qui correspond aux variations observées dans 99 % des cas. Les 1 % des cas situés aux extrémités sont considérés comme non représentatifs du fonctionnement général du système.

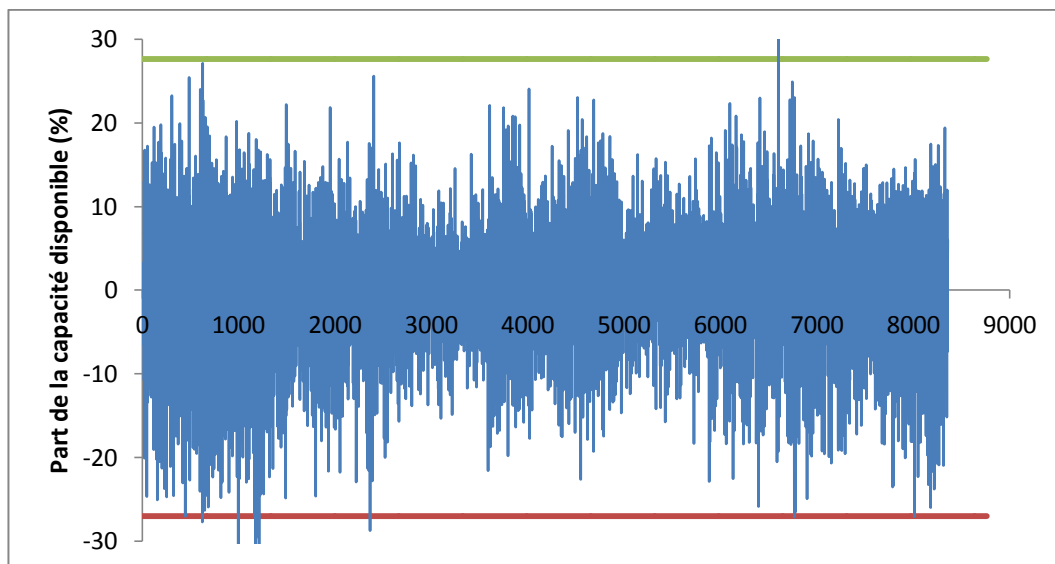


Figure 181 : Variation de la production d'hydraulique de lac en 2013 (en % de la capacité disponible) et variations maximales à la hausse (rouge) et à la baisse (vert) de production fixées dans le modèle.

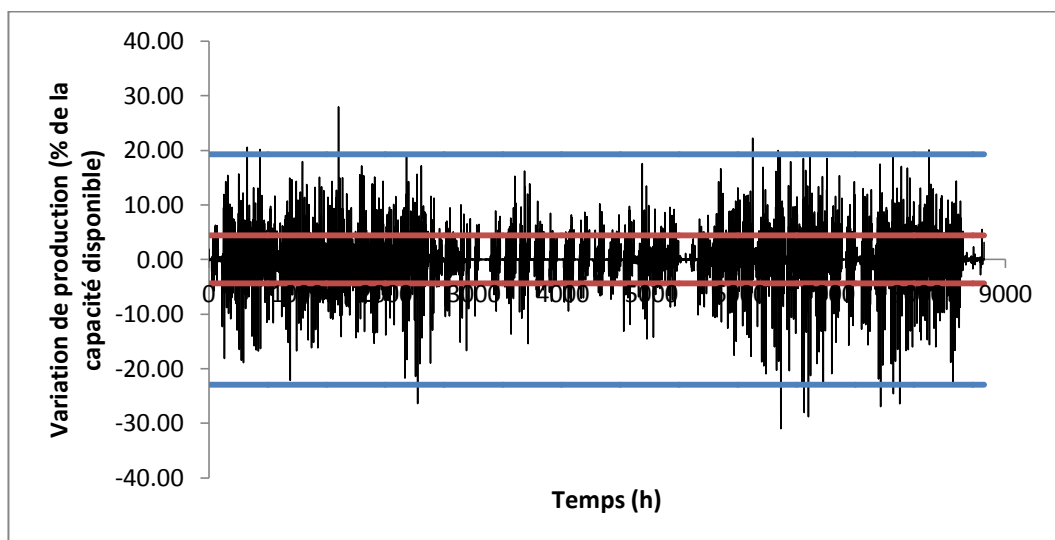


Figure 182 : Variation de la production de fossile (gaz et charbon) en 2013 (en % de la capacité disponible) et variations à la hausse et à la baisse (rouge) de production fixées dans le modèle pour le groupe fossile 1 (bleu) et 2 (rouge), correspondant respectivement au 90 et 10ème centile pour le groupe fossile 1 et aux 0,1% de valeur les plus basses et hautes pour le groupe fossile 2.

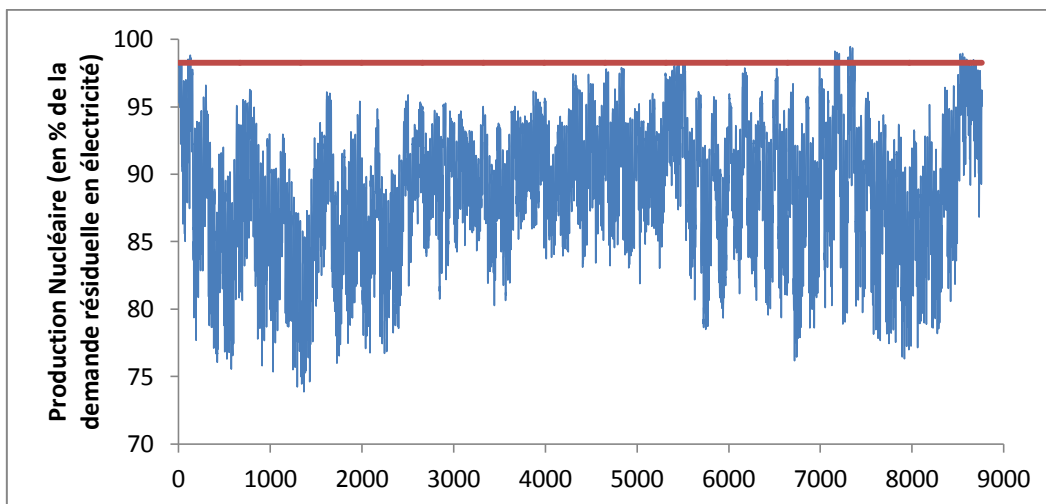


Figure 183 : Production nucléaire en 2013 exprimée en pourcentage de la demande résiduelle en électricité. La ligne rouge représente le dernier centile à 98,3 %

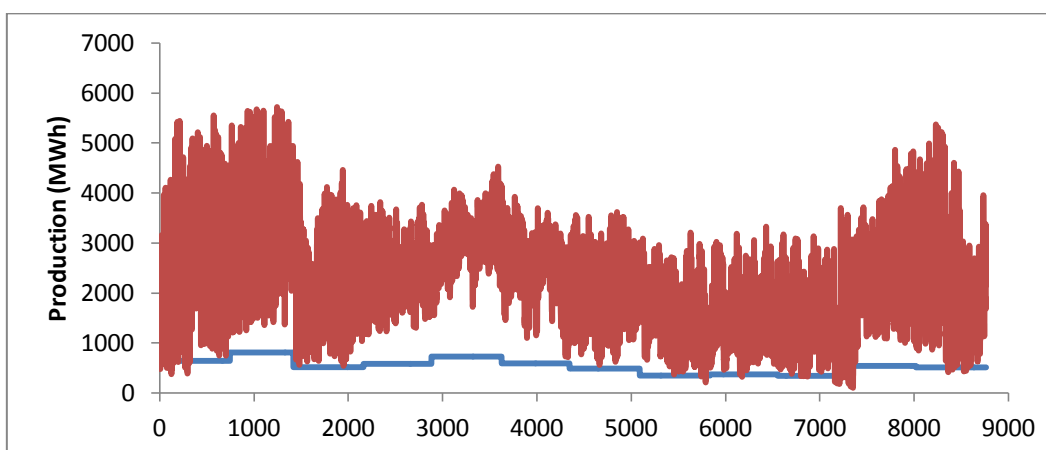


Figure 184 : Production hydraulique 2013 et borne minimale de production (en bleu)

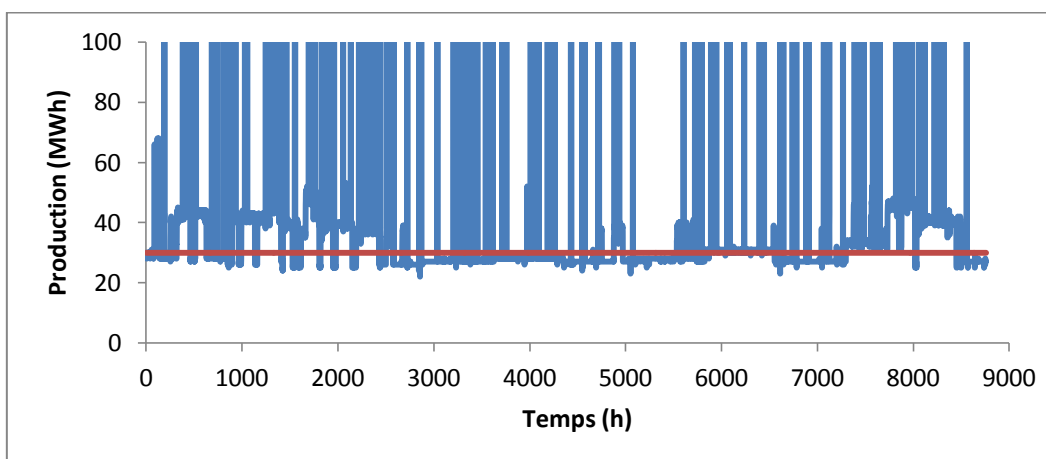


Figure 185 : Production de pointe (fioul et turbine à combustion) 2013 (en bleu) et borne minimale de production fixée dans le modèle (trait rouge)

Annexe J. Inventaire de cycle de vie écoinvent v3 APOS

A. LISTE DES PROCÉDÉS UTILISÉS DANS LA BASE DE DONNÉES

Nom Technologie Modèle	HT/MT/BT	Inventaire de cycle de vie écoinvent V3.1
Gaz - Cogén.	MT	heat and power co-generation, natural gas, 1 MW electrical, lean burn [Europe without Switzerland]
Fioul - Cogén.	MT	heat and power co-generation, diesel, 200 kW electrical, SCR-NOx reduction [CH]
Déchets	MT	treatment of municipal solid waste, incineration [FR]
Biomasse	MT	heat and power co-generation, wood chips, 6400 kW thermal, with extensive emission control [FR]
Biogaz	MT	heat and power co-generation, biogas, gas engine [FR]
Éolien	HT	electricity production, wind, 1-3 MW turbine, onshore [FR]
Solaire	BT	electricity production, photovoltaic, 570 kWp open ground installation, multi-Si [FR] 37 % electricity production, photovoltaic, 3 kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted [FR] 43 % electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted [FR] 20 %
Fil de l'eau + éclusée	HT	electricity production, hydro, run-of-river [FR]
Nucléaire	HT	electricity production, nuclear, pressure water reactor [FR]
Hydraulique - Lacs	HT	electricity production, hydro, reservoir, alpine region [FR]
STEP turbinage	HT	electricity production, hydro, reservoir, alpine region [FR] (la consommation d'électricité est comptabilisée à part)
Charbon	HT	electricity production, hard coal [FR]
Gaz - CCG	HT	electricity production, natural gas, combined cycle power plant [RoW]
Fioul/gaz - TAC	HT	electricity production, oil [FR]
Fioul - Autres	MT	electricity production, oil [FR]
Gaz - Autres	MT	natural gas, burned in micro gas turbine, 100 kWe [CH] treatment of blast furnace gas, in power plant [FR] treatment of coal gas, in power plant [FR]
Import BE	HT	electricity, high voltage, import from BE [FR]
Import CH	HT	electricity, high voltage, import from CH [FR]
Import DE	HT	electricity, high voltage, import from DE [FR]
Import ES	HT	electricity, high voltage, import from ES [FR]
Import GB	HT	electricity, high voltage, import from GB [FR]
Import IT	HT	electricity, high voltage, import from IT [FR]

B. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL PAR kWh FOURNI SUR LE RÉSEAU BT

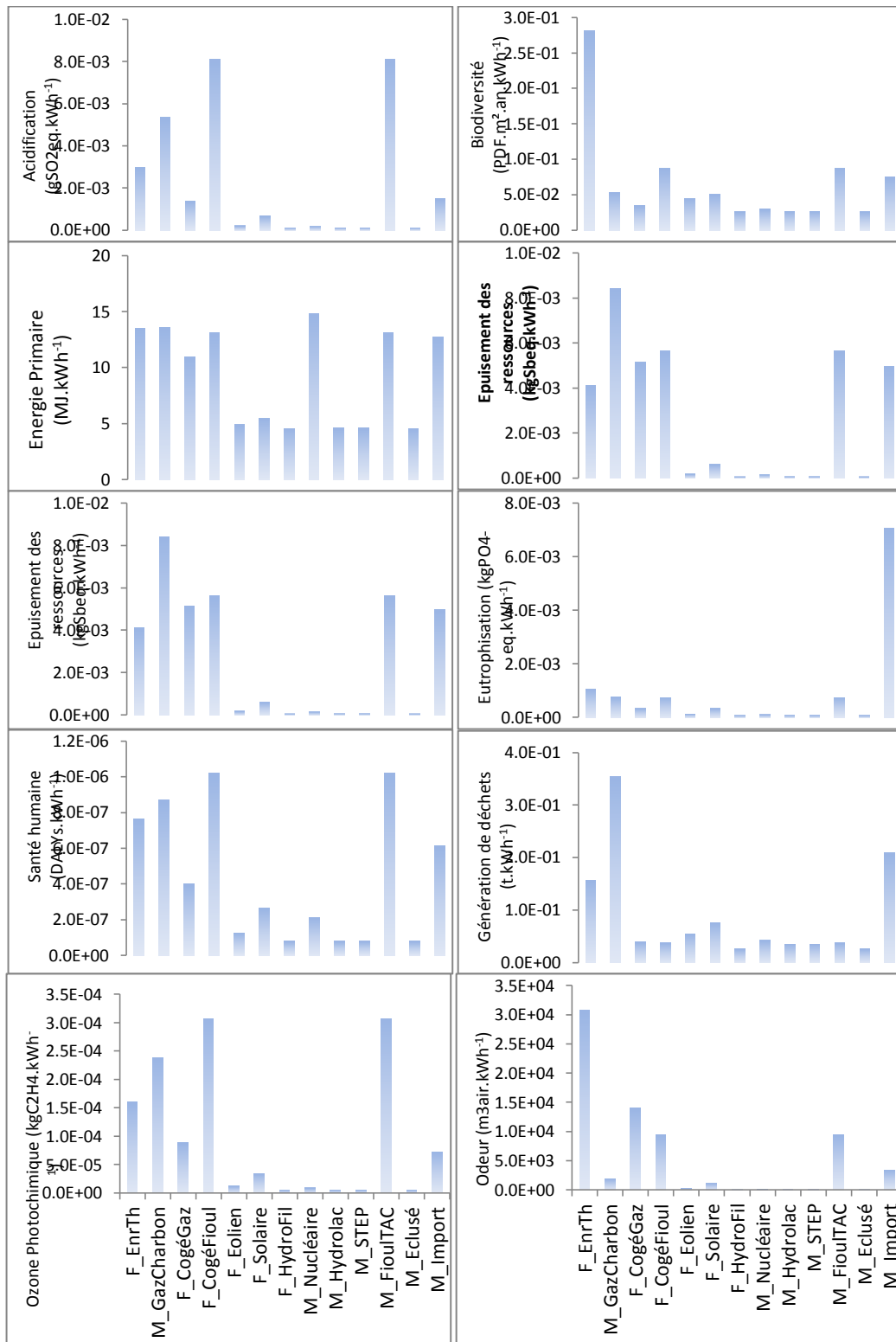


Figure 186 : Impacts environnementaux par kWh fourni au réseau BT, par technologie

Annexe K. Présentation de la chaîne logicielle Alcyone-Pléiades+Comfie-novaEQUER

i. Alcyone-Pléiades+COMFIE

Le modèleur graphique 3D ALCYONE (voir Figure 187) permet de saisir la géométrie du projet étudié et de présenter des vues 3D du projet. Il a été développé pour faciliter la saisie des informations à envoyer à Pléiades+COMFIE. Un zonage thermique peut également être effectué dans cet outil (groupement de pièces considérées à température homogène), ainsi qu'une spécification des compositions des parois, de la taille et du type des vitrages et des portes, des scénarios d'utilisation, des températures de consigne (chauffage ou climatisation) et des informations sur les ponts thermiques.

Les plans de l'architecte peuvent être importés dans le logiciel puis l'utilisateur redessine le bâtiment, étage par étage sur le calque défini par le plan. La succession de plan 2D associés aux données de hauteur permettent de générer une vue 3D du bâtiment. Les bâtiments environnants ou des éléments comme les arbres, générant des masques sur le bâtiment sont également dessinés et définis comme masques proches. Un relevé de masques lointain est aussi pris en compte.

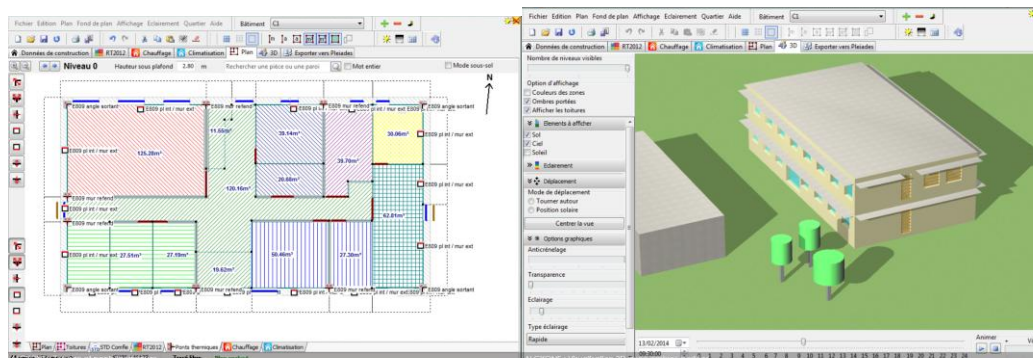


Figure 187 : Capture d'écran du logiciel Alcyone (<http://www.izuba.fr/logiciel/alcyone>)

À partir de la description géométrique du projet dans Alcyone, le bâtiment est décomposé en mailles dans COMFIE. Le moteur de calcul COMFIE simule ensuite le comportement dynamique d'un bâtiment en fonction des sollicitations auxquelles il est soumis (météorologie, comportement des occupants, équipements) en réalisant un bilan thermique sur chacune des mailles (Peuportier et Blanc Sommereux, I., 1990). La résolution est basée sur un modèle aux différences finies multizone réduit par analyse modale. Il calcule pour des pas de temps de 6 minutes ou plus, les températures, les besoins énergétiques et des indicateurs de confort pour les différentes zones thermiques du bâtiment simulé (Figure 188).

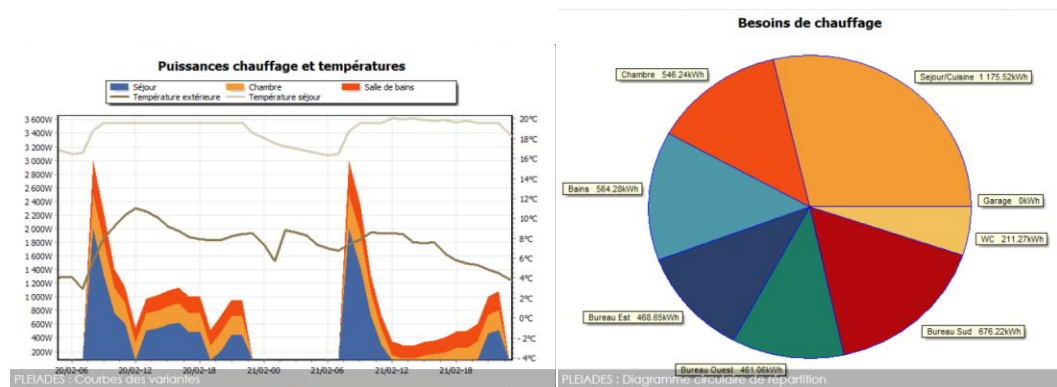


Figure 188 : Exemple de résultats Pleiades+COMFIE, (<http://www.izuba.fr/logiciel/pleiadescomfie>)

Ce modèle a été validé expérimentalement à plusieurs reprises (Peuportier, 2005 ; Munaretto, 2014 ; Brun et al., 2009 ; Recht et al., 2014). Il est régulièrement enrichi par l'intégration de nouveaux travaux de recherche, p. ex. l'utilisation de panneaux photovoltaïques intégrés au bâtiment (Guiavarch, 2003), intégration des mouvements d'air (Trocmé, 2009).

Il modélise de façon précise les effets d'inertie, des apports solaires et internes sur les besoins de chauffage et le confort d'été. La programmation objet utilisée pour le développement informatique du modèle permet de tester et d'ajouter facilement de nouveaux objets et fonctionnalités au modèle.

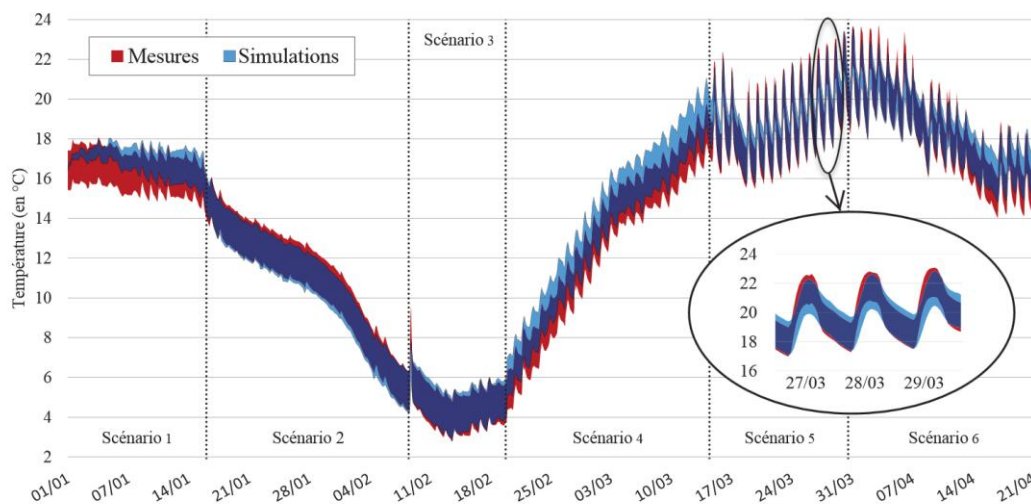


FIGURE 3. Bandes d'incertitudes des températures simulées et mesurées pour le séjour

Figure 189 : Validation de COMFIE, extrait de Recht et al. (Recht et al., 2014)

ii. NovaEQUER

Le logiciel NovaEQUER, nouvelle version du logiciel EQUER développé en 1995 (B. Polster, 1995), réalise une quantification des impacts environnementaux d'un bâtiment ou d'un quartier par la méthode d'analyse du cycle de vie (Figure 190).

Il utilise les résultats de la simulation thermique dynamique, les informations déjà renseignées (quantitatifs de matériaux, revêtements, menuiseries) et des informations complémentaires apportées par l'utilisateur dans l'interface NovaEQUER.

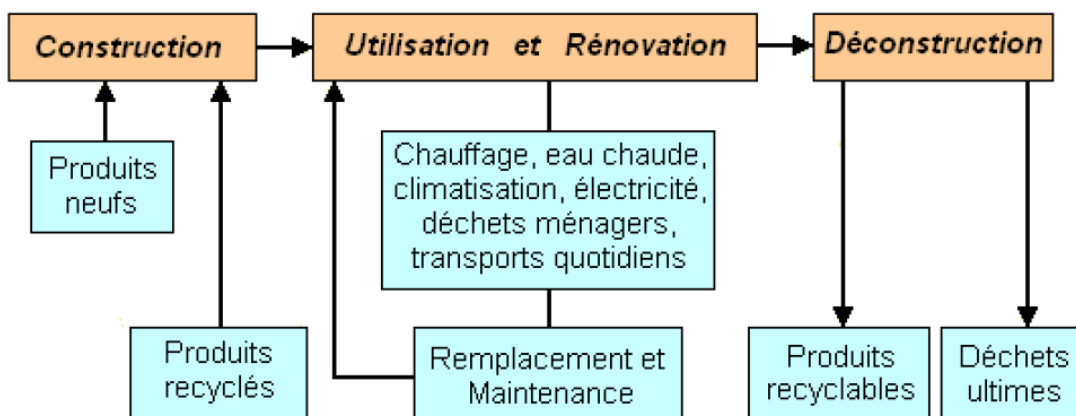


Figure 190 : Déroulement des calculs dans NovaEQUER, (B. Polster, 1995)

iii. Données supplémentaires nécessaires pour l'étude des bâtiments

Les informations sur les quantités de matériaux, les besoins de chauffage, les besoins de climatisation ainsi que la consommation d'électricité spécifique proviennent de la simulation thermique dynamique réalisée par Pléiades+COMFIE sur le bâtiment (ou chaque bâtiment du quartier). Les récents développements de Pléiades-Comfie sur les équipements et les systèmes permettent également d'obtenir, au pas de temps horaire, la production électrique d'origine photovoltaïque en sortie d'onduleur, et la part des besoins en eau chaude sanitaire couverte par un système solaire thermique.

Les informations de la STD doivent être complétées et précisées afin de tenir compte de l'ensemble des éléments inclus dans les frontières du système étudié. Les éléments à renseigner sont présentés dans le Tableau 59 en fonction de la phase du cycle de vie dans laquelle ils interviennent.

Tableau 59 : Paramètres à renseigner dans NovaEQUER

Construction/chantier	<ul style="list-style-type: none"> • Ajout des matériaux négligés dans l'étude thermique (fondations, aménagements extérieurs...) • Surplus chantier (bris de matériaux durant le chantier, 5 % par défaut) • Correspondance entre la bibliothèque thermique (caractéristiques thermiques des matériaux) et la bibliothèque environnementale (caractéristiques environnementales des matériaux*) • Distances de transport « lieu de fabrication des matériaux – chantier » et « site - structures de traitement de fin de vie (décharge, centre de tri) » • Ajout des équipements (p. ex. chaudière, panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques)
Utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Consommations d'énergie négligées dans l'étude thermique (électricité spécifique, éclairage, parkings, ascenseurs...) • Durée de vie du bâtiment (80 ans par défaut) • Mix électrique annuel moyen ou sélection de la méthode de mix dynamique par usage (Herfray 2011) • Rendement énergétique des équipements de chauffage / climatisation et de production d'ECS • Mix énergétique dans le cas de réseau de chaleur urbain • Consommation d'eau chaude et froide, présence éventuelle de toilettes sèches • Transport des occupants (km, moyen de transport**) • Gestion des déchets ménagers : quantité, recyclage**
Rénovation/démolition	<ul style="list-style-type: none"> • Durée de vie des menuiseries (30 ans par défaut), équipements (30 ans par défaut), revêtements (10 ans par défaut) • Distances de transport du site vers les structures de traitement de fin de vie (décharge, centre de tri) • Traitement en fin de vie des matériaux (décharge, incinération, recyclage)

* Basées sur la base de données ecoinvent v3. Des matériaux ayant des caractéristiques thermiques identiques peuvent avoir un bilan environnemental différent, p. ex. s'ils proviennent de filières de production différentes. Par exemple, une distinction est effectuée entre le bois certifié, provenant de forêts gérées durablement et le bois non certifié, provenant potentiellement de la déforestation de forêts primaires. Dans le 1^{er} cas, le stockage du carbone biogénique lors de la croissance du bois est intégré, alors qu'il est négligé dans le 2^{ème} cas.

** Prise en compte de ces paramètres si les contributeurs correspondants sont inclus dans les frontières de l'étude. Ceci dépend des objectifs de l'étude.

iv. Les données supplémentaires nécessaires pour l'étude des quartiers

Les différents bâtiments composant un quartier peuvent être groupés dans un même fichier projet. La méthodologie complète d'analyse des quartiers est expliquée dans les travaux de thèse de Popovici (Popovici, 2005).

La partie « Quartier » de NovaEquer permet d'intégrer les réseaux, voiries et des espaces verts appartenant au quartier. Les opérations d'entretien des espaces verts (arrosage, tonte, déchets organiques), les services utilisés (éclairage), la composition des voiries et réseau sont pris en compte. L'agencement du quartier et les masques que peuvent engendrer les bâtiments

les uns sur les autres sont des caractéristiques importantes qui doivent être prises en compte dès la simulation thermique dynamique. L'analyse du quartier permet de déterminer l'imperméabilité de la parcelle ainsi que l'utilisation des sols en plus des 12 indicateurs environnementaux disponibles à l'échelle du bâtiment.

C. MÉTHODE ATTRIBUTIONNELLE DYNAMIQUE ET CONSÉQUENTIELLE

Le modèle développé par Grégory Herfray (Herfray, 2011b) a été implémenté dans l'outil NovaEQUER en 2012 (Roux, 2013). L'approche déjà implémentée est proche des approches attributionnelles dynamique et conséquentielle par usage pour le calcul des impacts environnementaux. En effet, elles sont basées sur des mix statiques.

L'approche de Herfray s'appuie sur cinq fichiers textes de trois colonnes (nucléaire, hydraulique, thermique fossile) de 8760 valeurs donnant pour chaque heure de l'année et chaque usage (chauffage-clim, ECS, électricité spécifique domestique ou professionnelles, ou moyen) un mix électrique.

Les différences avec les données utilisées dans cette thèse sont :

- La procédure de génération du mix électrique.
- Le résultat des nouvelles approches développées donnent pour chaque heure de l'année une évaluation des impacts environnementaux générés pour la consommation d'un kWh électrique sur le réseau basse tension et ne donnent pas un mix électrique comme c'était le cas pour l'approche précédente.

À partir de ces éléments, on définit la procédure d'implémentation suivante. Cinq nouveaux fichiers textes sont créés (éléments « d ») dans la Figure 66), correspondant aux mix par usage et au mix attributionnelle dynamique. Ils sont constitués de 12 colonnes de 8760 valeurs correspondant à une valeur d'impact par kWh distribué pour chaque heure de l'année.

La structure existante est inchangée, seule la traduction du mix électrique en impacts environnementaux est court-circuitée. Les impacts environnementaux sont simplement donnés par la multiplication du vecteur horaire des besoins nets en électricité (production d'électricité défalquée, au prorata de chaque usage à l'heure h , comme actuellement implémenté) par la matrice des impacts correspondants.

D. MÉTHODE MARGINALE COURT TERME

Concernant l'approche marginale, la procédure est différente. Le mix marginal va être différent pour chaque projet et nécessite de lancer une

simulation de la partie modulable du système électrique à chaque évaluation de projet.

Les conséquences de la réalisation du projet en termes de production électrique sont données par la différence entre la production qui aurait lieu sans le projet et la production qui aura lieu avec la demande supplémentaire du projet à couvrir. La production qui aurait lieu sans le projet correspond à la production générée par le fichier « Production Type » (élément « d' ») de la Figure 66).

Le calcul des impacts environnementaux de l'électricité par la méthode marginale est effectué par l'exécutable « CalcullImpactElecMD.exe » (voir Figure 66), selon la procédure suivante :

- Le modèle s'appuie sur le fichier donnant la production-type.
- Le bilan électrique horaire du projet étudié (consommation d'électricité à laquelle on soustrait la production d'électricité) est exporté dans un fichier texte dans le dossier de travail de la variante (élément « e ») de la Figure 66). Ce bilan est facilement accessible dans le programme à travers la consommation nette du bâtiment et la production exportée qui sont toutes deux calculées.
- L'exécutable « CalcullImpactElecMD.exe » est appelé par le logiciel NovaEQUER, grâce à la fonction « ShellExectute ». Cette fonction permet également de passer des paramètres au programme exécuté. Le paramètre transmis est le répertoire de travail dans lequel se situe le fichier texte correspondant au bilan électrique.
- Le programme permet alors de calculer la variation de la production électrique due à la demande supplémentaire du projet étudié puis les 12 indicateurs environnementaux correspondants.
- Le résultat (12 valeurs correspondant aux 12 indicateurs environnementaux) est exporté dans un fichier texte qui peut ensuite être lu par NovaEQUER et affiché dans l'interface.

Concernant cette dernière approche, un affichage des impacts environnementaux par usage (chauffage, ECS, électricité spécifique...) dans l'interface de NovaEQUER n'est pas possible. Si l'approche peut être testée sur un usage particulier, le résultat de l'évaluation environnementale sur un bâtiment entier n'est pas nécessairement égal à la somme des résultats de chaque usage. Il est donc nécessaire d'afficher une colonne « Électricité marginale » dans l'affichage des résultats. Cette procédure allonge de façon significative le temps de calcul nécessaire pour la simulation d'une variante. Si ce n'est pas préjudiciable à l'échelle d'un projet (moins de 30 s de simulation), cela peut être problématique dans le cas d'analyses d'incertitudes et de sensibilité.

E. MISE À JOUR DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE

Les méthodes attributionnelle dynamique et conséquentielle par usage fonctionnent sur la base de cinq fichiers texte donnant pour chaque heure de l'année la valeur des 12 indicateurs environnementaux liés à la consommation d'un kWh d'électricité du réseau basse tension. La méthode marginale fonctionne sur la base d'un fichier donnant la production électrique de référence obtenue en l'absence du projet étudié. Un exécutable a été créé pour générer ces six fichiers (GenerFichierMixDyn.exe) et permettre une mise à jour des paramètres du modèle. La liste des fichiers texte modifiables est présentée dans le Tableau 60.

Tableau 60 : Fichier texte pour le paramétrage du modèle

Fichier texte	Description
CalendrierRef.txt	(4 x 8760) : heure (1-24), saison (1-4), mois (1-12), jour (1-7) pour l'année de référence
CapacitesInstallees.txt	Éolienne (MW), PV (MW), EnrTh (MW), CHP gaz (MW), CHP Fioul (MW), nucléaire (MW), charbon (MW), gaz (MW), hydro fatal (MW), hydro modulable (MW), STEP (MW), Stock2050 (MW), import (MW), export (MW), autre (MW)
Coeff_T_ref.txt	Coefficients de pondération par zone thermique pour le calcul de la température nationale de référence (cf. Chap. 3)
Conso_C_heure.txt	Coefficients horaires de variation de la consommation nationale (cf. Chap. 3)
Conso_C_jour.txt	Coefficients journalier de variation de la consommation nationale (cf. Chap. 3)
Conso_C_mois.txt	Coefficients mensuels de variation de la consommation nationale (cf. Chap. 3)
ConsoTotale.txt	Consommation nationale totale, en TWh, valeur par défaut : 481,5 TWh
DispoModulable.txt	Disponibilité des moyens de production modulable (8760 valeur entre 0 et 1 pour chaque technologie) : charbon, export, fioul, gaz, (hydraulique éclusé), hydraulique de lac, importation, nucléaire, pompage
Fchargehisto_fatal.txt	Facteurs de charge horaires issus des historiques de production, pour les productions fatales : cogénération fioul, cogénération gaz, inconnue, thermique ENR, hydraulique au fil de l'eau. (cf. Chap. 3)
GradientEte.txt	Variation de la consommation nationale en fonction de la température, en été. Valeur par défaut : 500 MW.C ⁻¹
GradientHiver.txt	Variation de la consommation nationale en fonction de la température, en hiver. Modulation selon les heures. 24 valeurs. Valeur moyenne par défaut : 2366 MW.C ⁻¹
H1a.txt, H1b.txt, H1c.txt, H2a.txt, H2b.txt, H2c.txt, H2d.txt, H3.txt	Données météorologiques pour les 8 zones thermiques correspondant à la RT2012. Pour chaque station, 10 colonnes et 8760 lignes, correspondants aux paramètres et unités suivants : heure (0-8759), température (°C), poids d'eau au niveau de la mer (g.kg ⁻¹), rayonnement direct normal (W.m ⁻²), rayonnement diffus horizontal (W.m ⁻²), température du ciel (°C), vitesse du vent (m.s ⁻¹), température d'eau alimentant la production d'ECS à l'altitude 0 m (°C), hauteur du soleil (°), orientation du soleil par rapport au sud (°)
Param_modul.txt	Paramètres du modèle d'optimisation linéaire sous contraintes de la production modulable (cf. Chap. 3)
Param_prod_autres.txt	Cinq autres paramètres intervenant dans le modèle : l'utilisation maximale de capacité STEP (0,95), les productibles hydrauliques fatale (41,1 TWh) et modulable (20,9 TWh), la disponibilité du nucléaire (écart à la moyenne), (le rendement de capacité futures de stockage (0,5))
Pond_eol.txt	La pondération par zone thermique en fonction de la capacité éolienne installée pour le calcul du facteur de charge éolien moyen
Pond_sol.txt	La pondération par zone thermique en fonction de la capacité PV installée pour le calcul du facteur de charge PV moyen
SoldeEchange.txt	Solde annuel des échanges, valeur par défaut : 62,6 TWh
Temp_seuil_ete.txt	Température seuil au-dessus de laquelle se déclenchent les effets de gradient

	thermique d'été pour le calcul de la consommation nationale, valeur par défaut 18°C
Temp_seuil_hiver.txt	Température seuil en-dessous de laquelle se déclenche les effets de gradient thermique d'hiver pour le calcul de la consommation nationale, valeur par défaut 15°C
UsageLac.txt	Courbe d'usage du productible hydraulique modulable. (cf. Chap. 3)

Si l'utilisateur souhaite changer les caractéristiques du système électrique, il peut modifier ces fichiers texte puis lancer l'exécutable pour recalculer la production-type et les impacts dynamiques horaires et horaires par usage.

Annexe L. Compositions des parois des maisons I-BB et I-OB (Pannier, 2014)

A. MAISON I-BB

Les compositions des parois ainsi que les caractéristiques des matériaux sont données ci-après :

Type de paroi	Nom de la paroi
Mur extérieur	IBB - Mur extérieur
Mur pignon	IBB - Mur Pignon
Sol	IBB - Sol
Vide sanitaire	IBB - Mur vide sanitaire
Plancher bas	IBB - Plancher bas
Plancher intermédiaire	IBB - Plancher intermédiaire
Plancher haut	IBB - Combles
Toiture	IBB - Toiture
Cloisons intérieures	IBB - Cloisons intérieures
Paroi interne pilier	IBB - Pilier

IBB - Mur extérieur

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
INES - Crépis	1,5	0,700	1400	0,278	46,67	0,02
INES - Polystyrène extrudé type WALLMATE EXL-X	20,0	0,030	35	0,389	0,15	6,67
INES - Enduit hydrofuge	1,5	1,000	1800	0,278	66,67	0,02
INES - Béton banché	15,0	1,750	2300	0,256	11,67	0,09
INES - Plâtre gypse	1,0	0,430	1200	0,278	43,00	0,02

IBB - Mur Pignon

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
INES - Crépis	1,5	0,700	1400	0,278	46,67	0,02
INES - Polystyrène extrudé type WALLMATE EXL-X	20,0	0,030	35	0,389	0,15	6,67
INES - Enduit hydrofuge	1,5	1,000	1800	0,278	66,67	0,02
INES - Béton banché	15,0	1,750	2300	0,256	11,67	0,09
INES - LDV ISOCONFORT 32	10,0	0,032	12	0,233	0,32	3,13

IBB - Sol

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Argile ou limon	100,0	1,500	1500	0,579	1,50	0,67

IBB - Mur vide sanitaire

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
INES - Polystyrène extrudé Roofmate SL-X	20,0	0,029	35	0,389	0,15	6,90
INES - Enduit hydrofuge	1,5	1,000	1800	0,278	66,67	0,02
INES - Béton banché	15,0	1,750	2300	0,256	11,67	0,09
INES - Enduit hydrofuge	1,5	1,000	1800	0,278	66,67	0,02
INES - Polystyrène extrudé Roofmate SL-X	20,0	0,029	35	0,389	0,15	6,90

IBB - Plancher Bas

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
INES - Polystyrène extrudé Styrofoam LB-X	20,0	0,030	35	0,389	0,15	6,67
INES - Dalle pleine en béton armé	16,0	2,500	2400	0,278	15,63	0,06
INES - Chape Béton	8,0	1,750	2400	0,244	21,88	0,05
INES - Carrelage	1,0	0,410	1200	0,278	41,00	0,02

IBB - Plancher Intermédiaire

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Placoplatre BA 13	1,3	0,325	850	0,222	25,00	0,04
INES - lame d'air 15 cm	15,0	0,938	1	0,340	6,25	0,16
Plancher poutrelles + hourdis (16+4)	20,0	1,053	800	0,180	5,26	0,19
INES - Chape Béton	8,0	1,750	2400	0,244	21,88	0,05
INES - Carrelage	1,0	0,410	1200	0,278	41,00	0,02

IBB - Combles

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Placoplatre BA 13	1,3	0,325	850	0,222	25,00	0,04
INES - lame d'air 15 cm	15,0	0,938	1	0,340	6,25	0,16
INES - LDV ISOCONFORT 35	40,0	0,035	12	0,233	0,09	11,43

IBB - Toiture

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
INES - Tuiles Terre cuite	1,5	2,200	2700	0,209	146,67	0,00

IBB - Cloisons intérieures

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
INES - Plâtre gypse	1,5	0,430	1200	0,278	28,67	0,03
INES - Laine de verre	4,0	0,041	25	0,286	1,03	0,98
INES - Plâtre gypse	1,5	0,430	1200	0,278	28,67	0,03

IBB - Pilier

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
INES - Béton banché	15,0	1,750	2300	0,256	11,67	0,09

B. MAISON I-OB

Les compositions des parois ainsi que les caractéristiques des matériaux sont données ci-après :

Type de paroi	Nom de la paroi
Mur extérieur	IOB - Compo Multiple Mur Extérieur
Mur pignon	IOB - Compo Multiple Mur Pignon
Sol	IBB - Sol
Vide sanitaire	IBB - Mur vide sanitaire
Plancher bas	IBB - Plancher bas
Plancher intermédiaire	IOB - Compo Multiple Plancher Intermédiaire
Plancher haut	IOB - Compo Multiple Plancher combles
Toiture	IBB - Toiture
Cloisons intérieures	IOB - Cloison 122 et IOB - Cloison 212

IOB - Compo Multiple Mur Extérieur

On a 82 % de la composition suivante :

Composante : Simple	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
INES - Crépis	0,6	0,700	1400	0,278	116,67	0,00
Fibres-ciment cellulose (1000 < ? = 1400)	2,5	0,350	1200	0,278	14,00	0,07
IOB - Laine de bois	54,0	0,039	160	0,583	0,24	4,10
Panneau OSB	2,5	0,130	650	0,470	5,20	0,19
Placoplatre BA 10	1,0	0,333	850	0,222	33,33	0,03
Total					0,09	10,82

et 18 % de la composition suivante :

Composante : Simple	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Bois Lourd	54	0,23	351	0,667	0,43	2,35

IOB - Compo Multiple Mur Pignon

On a 82 % de la composition suivante :

Composante : Simple	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
INES - Crépis	0,6	0,700	1400	0,278	116,67	0,00
Fibres-ciment cellulose (1000 < ? = 1400)	2,5	0,350	1200	0,278	14,00	0,07
IOB - Laine de bois	79,4	0,039	160	0,583	0,24	4,10
Panneau OSB	2,5	0,130	650	0,470	5,20	0,19
Placoplatre BA 10	1,0	0,333	850	0,222	33,33	0,03
Total					0,09	10,82

et 18 % de la composition suivante :

Composante : Simple	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Bois Lourd	79,4	0,23	650	0,667	0,29	3,45

IBB - Mur vide sanitaire

Voir I-BB

IBB – Plancher bas

Voir I-BB

On utilise le même plancher bas que dans I-BB et dans I-DM alors qu'en réalité, le plancher bas n'est pas composé des mêmes éléments, Ce choix est fait pour harmoniser les valeurs de ponts thermiques choisies pour le plancher bas.

IOB - Compo Multiple Plancher Combles

On a 84 % de la composition suivante :

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Placoplâtre BA 10	1,0	0,333	850	0,222	33,33	0,03
Lame d'air	15,0	0,938	1	0,340	6,25	0,16
IOB - Laine de bois	94,8	0,039	160	0,583	0,24	4,10
Panneau OSB	1,9	0,130	650	0,470	6,84	0,15
Fibre de bois	2,0	0,150	800	0,580	7,50	0,13

et 16 % de la composition suivante :

Composante : Simple	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Bois Lourd	94,8	0,23	650	0,667	0,24	4,12

IOB - Compo Multiple Plancher Intermédiaire

On a 68 % de la composition suivante :

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Placoplatre BA 10	1,0	0,333	850	0,222	33,33	0,03
Lame d'air	15,0	0,938	1	0,340	6,25	0,16
Panneau OSB	1,9	0,130	650	0,470	6,84	0,15
Fibre de bois	2,0	0,150	800	0,580	7,50	0,13

et 32 % de la composition suivante :

Composante : Simple	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Bois Lourd	15	0,23	650	0,667	1,49	0,65

IBB - Sol

Voir I-BB

IBB - Toiture

Voir I-BB

IOB - Cloisons intérieures

Il existe deux tailles de cloisons pour la maison I-OB (cloisons de 122mm et de 212mm)

Cloison de 122 : il s'agit d'une composition multiple.

On a 88 % de la composition suivante :

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Placoplatre BA 10	0,95	0,333	850	0,222	3,51	0,03
Panneau OSB	1,6	0,130	650	0,470	8,13	0,12
Laine de verre	6	0,041	25	0,286	0,68	1,46
Lame d'air	2,81	0,933	1	0,340	33,3	0,03
Panneau OSB	1,6	0,130	650	0,470	8,13	0,12
Placoplatre BA 10	0,95	0,333	850	0,222	3,51	0,03

et 12 % de la composition suivante :

Composante : Simple	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Bois Lourd	7	0,23	650	0,667	3,28	0,30

Cloison de 122 : il s'agit d'une composition multiple,

On a 71 % de la composition suivante :

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Placoplatre BA 10	0,95	0,333	850	0,222	3,51	0,03
Panneau OSB	1,6	0,130	650	0,470	8,13	0,12
Laine de verre	16	0,041	25	0,286	0,26	3,90
Lame d'air	1,81	0,933	1	0,340	51,55	0,02
Panneau OSB	1,6	0,130	650	0,470	8,13	0,12
Placoplatre BA 10	0,95	0,333	850	0,222	3,51	0,03

et 29 % de la composition suivante :

Composante : Simple	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Bois Lourd	12	0,23	650	0,667	11,92	0,52

Annexe M. Facteurs de caractérisation des émissions de CO₂, NO_x et PM

Facteurs de caractérisation	CO ₂	NO _x	PM
Énergie Primaire	0	0	0
Consommation d'eau	0	0	0
Déchets radioactifs	0	0	0
Déchets non radioactifs	0	0	0
Épuisement des ressources abiotiques	0	0	0
Effet de serre (IPCC 2007)	1,00	0	0
Acidification (CML 2001)	0	5,00E-01	0
Eutrophisation (CML 2001)	0	1,30E-01	0
Ozone photochimique(CML 2001)	0	0 ¹²⁸	0
Odeur	0	0	0
Biodiversité (Eco-indicator 99)	0	5,71E+00	0
Santé humaine (Eco-indicator 99)	2,10E-07 ¹²⁹	8,87E-05	7,00E-04

¹²⁸ Un facteur nul est considéré pour les oxydes d'azote car on considère qu'ils sont en excès dans l'atmosphère (*high nox*) et qu'ils ne sont pas par conséquent le facteur limitant pour la création d'ozone photochimique. Les composés organiques volatiles (COV) sont donc les composés limitants.

¹²⁹ Ce facteur de caractérisation correspond aux effets des changements climatiques sur la santé humaine. Il peut être ou non considéré sachant qu'un indicateur effet de serre est déjà présent.

Annexe N. Représentations schématiques du recyclage et de la valorisation matière

Source :tiré de Schrijvers, 2016

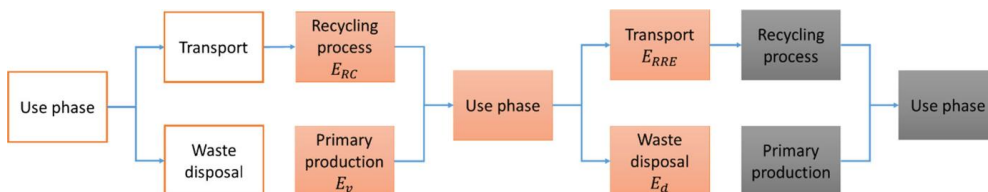


Figure 191 : Représentation schématique de l'approche « cut-off »

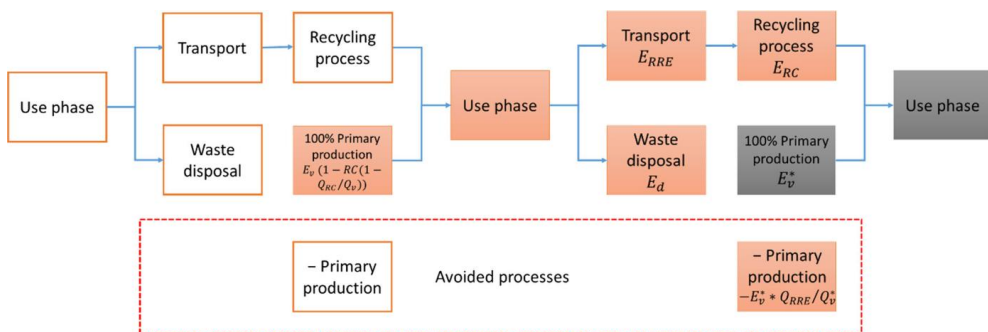


Figure 192: Représentation schématique de l'approche « end-of-life »

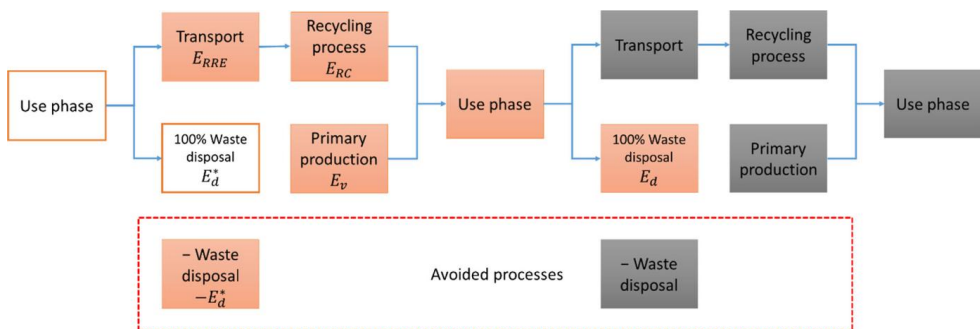


Figure 193 : Représentation schématique de l'approche « waste mining »

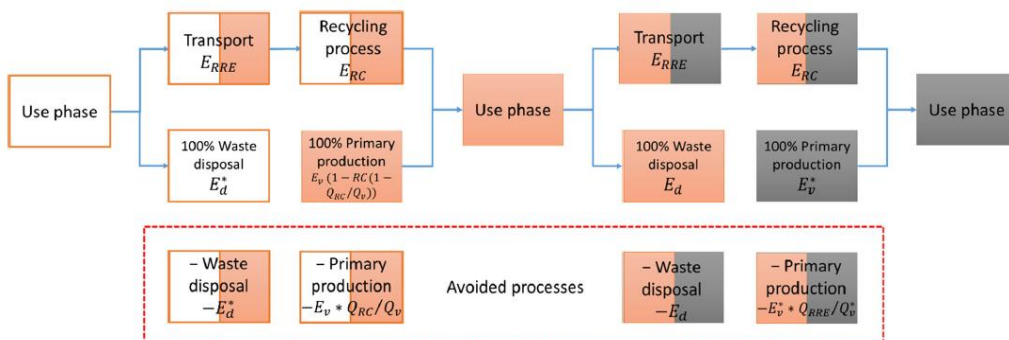


Figure 194: Représentation schématique de l'approche 50-50

Annexe O. Incinération des déchets ménagers

Tableau 61 : Facteurs de normalisation

Impacts	Value	Date	Source	Représentativité
Effet de serre (t CO ₂ -eq)	8,7	1997	CITEPA	France
Acidification (kg SO ₂ -eq)	62,3	1997	CITEPA	France
Énergie Primaire (GJ)	177,8	1999	RECORD	France
Consommation d'eau (m ³)	339	1997	IFEN	France
Déchets non radioactifs(t)	10	1997	ADEME	France
Épuisement des ressources abiotiques (kg Sb eq.)	32,6	1995	Guinée 2001	Europe
Eutrophisation (kg PO ₄ eq.)	38,1	1997	CITEPA	France
Ozone photochimique (kg C ₂ H ₄ eq.)	19,7	2012	CITEPA	France
Biodiversité (PDF.m ² .an)	13700	2005	Jolliet 2005	Europe
Déchets radioactifs (dm ³)	0,51	1997	ANDRA	France
Santé humaine (DALY)	0,0068	2005	Jolliet 2005	Europe

Tableau 62 : Impacts générés par la production d'un MJ de chaleur à partir de gaz ou de fioul (chaudière), base ecoinvent v3

Impact évité/MJ délivrée	Ressources abiotiques	Dommages à la biodiversité	Acidification	Déchets inertes	Odeur	Ozone photochimique	Énergie primaire	Eutrophisation	Déchets radioactifs	Consommation d'eau	Toxicité humaine	Potentiel de réchauffement global
Unité de l'impact	KgSbeq	PDF.m ² .an	kgSO ₂ eq	T	Mm ³	kgC ₂ H ₄ eq	MJ	kgPO ₄ -	Dm ³	L	DALYs	kgCO ₂ eq
Chaleur Gaz	5.8E-04	4.8E-04	8.5E-05	2.9E-03	1.6E+03	6.6E-06	1.2E+00	2.0E-05	6.1E-10	3.6E-02	2.9E-08	6.9E-02
Chaleur Fioul	5.7E-04	6.5E-03	5.9E-04	1.9E-03	6.4E+02	2.8E-05	1.3E+00	3.1E-05	3.5E-09	9.1E-02	7.0E-08	9.3E-02

Ces impacts ont été calculés sur la base des procédés ecoinvent :

- *heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW ;*
- *heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW [CH].*

Impacts évités maximaux : polyéthylène remplaçant du fioul (PCI max) ; Impacts évités minimaux : déchets organiques remplaçant du gaz.

Le Tableau ci-dessous donne les impacts évités dans les deux cas de figure, ce qui permet de donner un encadrement de la valeur des impacts évités.

Tableau 63 : Impacts évités en minimaux et maximaux en considérant le PCI du déchet et le combustible évité, base ecoinvent v3

Impact Evité	Ressources abiotiques	Dommages à la biodiversité	Acidification	Déchets inertes	Odeur	Ozone photochimique	Énergie primaire	Eutrophisation	Déchets radioactifs	Consommation d'eau	Toxicité humaine	Potentiel de réchauffement global
Unité	KgSbeq	PDF.m ² .an	kgSO2eq	T	Mm3	kgC2H4eq	MJ	kgPO4-	Dm3	L	DALYs	kgCO2eq
Min	2.1E-03	2.4E-02	2.1E-03	7.1E-03	2.3E+03	1.0E-04	4.7E+00	1.1E-04	1.3E-08	3.3E-01	2.6E-07	3.4E-01
Max	2.0E-02	2.4E-01	2.1E-02	7.0E-02	2.3E+04	1.0E-03	4.7E+01	1.1E-03	1.3E-07	3.3E+00	2.5E-06	3.4E+00

Étant donné la récente enquête du syndicat national du chauffage urbain et de la climatisation urbaine (http://reseaux-chaaleur.cerema.fr/wp-content/uploads/20150205-ENQUETE_2013_Rapport-final-2014.pdf), l'impact évité est le plus probablement du gaz naturel, dans le cas de la production de chaleur, ou éventuellement du charbon ou du fioul lourd.

Fig. 4.2 - Les 10 principales énergies sur les réseaux de chaleur (en GWh d'énergie produite)

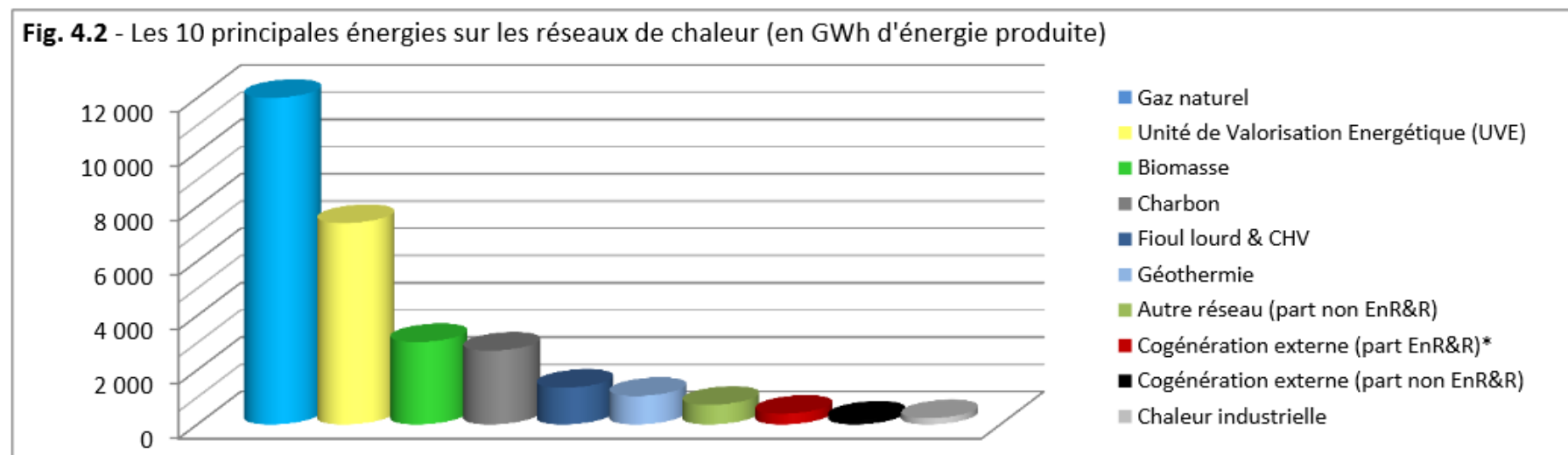


Figure 195 : Principales énergies utilisées dans les réseaux de chaleur urbains en France (source : http://reseaux-chaleur.cerema.fr/wp-content/uploads/20150205-ENQUETE_2013_Rapport-final-2014.pdf)

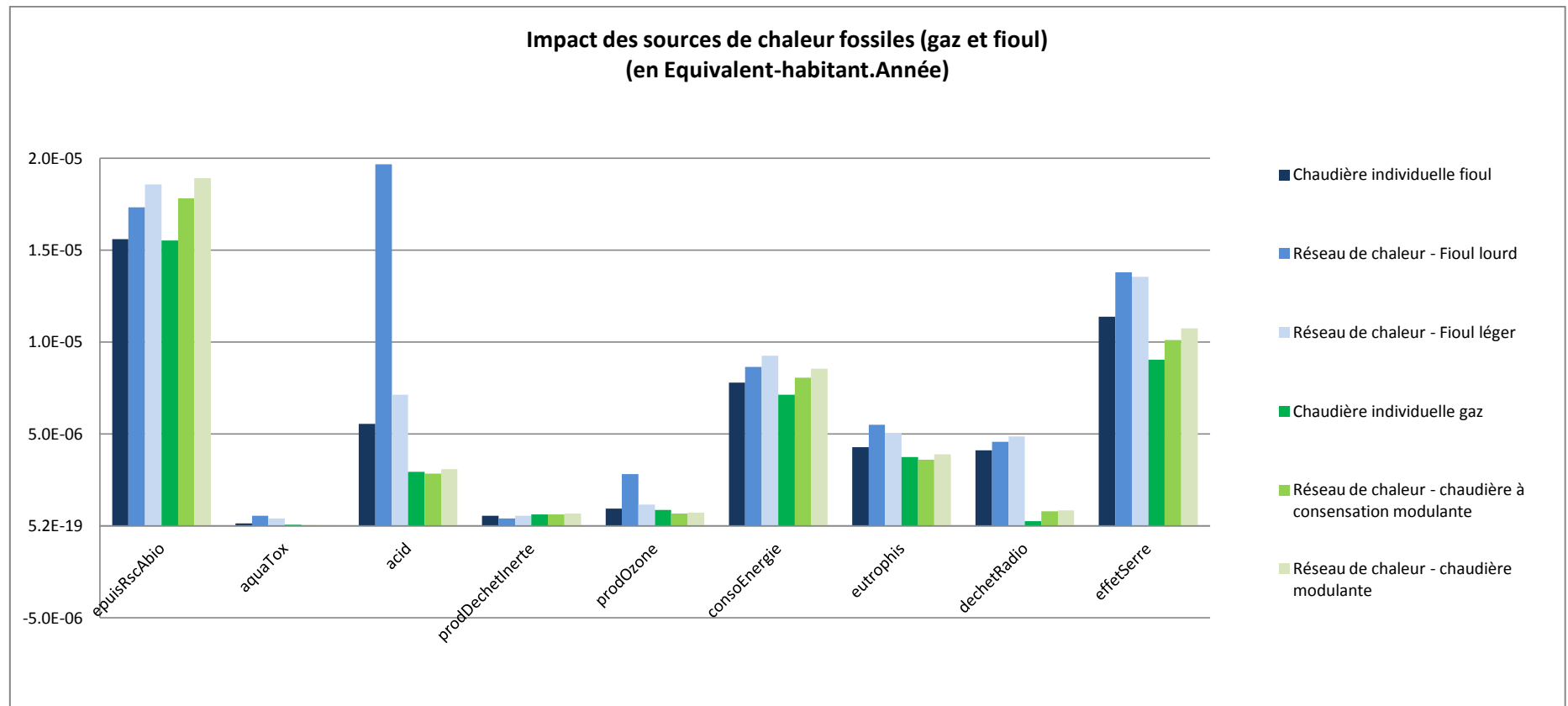


Figure 196 : Impacts de la production de chaleur à base de combustibles fossiles, base ecoinvent v3

Pertes de distribution : 12 % réseaux de chaleur, 0 % chaudière individuelle

Rendement énergétique des incinérateurs

La quantité d'énergie produite par les incinérateurs dépend du PCI des déchets incinérés, du rendement des installations de production d'énergie (chaudière, turboalternateur...), de l'autoconsommation d'énergie par l'installation et de sa capacité à trouver un débouché pour l'énergie produite. Il est difficile d'obtenir des données moyennes pour chacune de ces étapes. En revanche, il est possible de calculer à partir du total de l'énergie produite (énergie autoconsommée incluse) ou vendue (autoconsommation exclue), le rendement moyen national des UIOM. En comparaison des rendements calculés dans le Tableau 3, au paragraphe 3275.3.6 les mêmes valeurs calculées pour les incinérateurs suisses pour l'année 2000 par les rédacteurs de la base de données ecoinvent sont données à la Figure 197. Les étoiles rouges représentent les valeurs calculées pour les incinérateurs français.

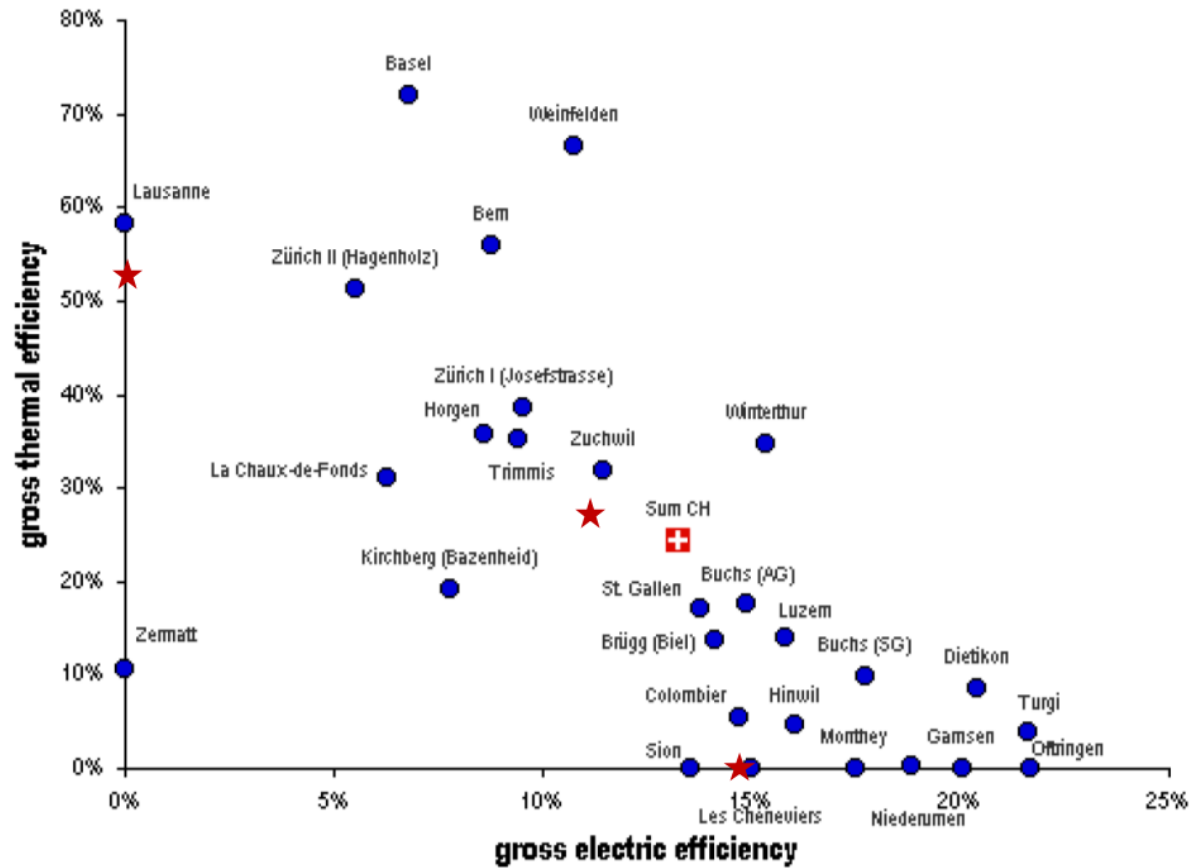


Figure 197 : Rapport ecolInvent 13-II Waste Incineration V2.1(Doka, 2007)

Tableau 64 : Liste des 55 procédés d'incinération de déchets solide analysés, base ecoinvent v3

<i>treatment of raw sewage sludge, municipal incineration</i>	<i>treatment of waste polyurethane, municipal incineration</i>
<i>treatment of waste wood, untreated, municipal incineration</i>	<i>treatment of waste polyvinylchloride, municipal incineration</i>
<i>treatment of biowaste, municipal incineration</i>	<i>treatment of scrap tin sheet, municipal incineration</i>
<i>treatment of waste polyethylene terephthalate, municipal incineration</i>	<i>treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration</i>
<i>treatment of waste cement-fibre slab, municipal incineration</i>	<i>treatment of hard coal ash, municipal incineration</i>
<i>treatment of waste mineral oil, hazardous waste incineration</i>	<i>treatment of bilge oil, hazardous waste incineration</i>
<i>treatment of waste polypropylene, municipal incineration</i>	<i>treatment of waste paint, hazardous waste incineration</i>
<i>treatment of waste polyethylene, municipal incineration</i>	<i>treatment of waste emulsion paint, hazardous waste incineration</i>
<i>treatment of waste paperboard, municipal incineration</i>	<i>treatment of fly ash and scrubber sludge, hazardous waste incineration</i>
<i>treatment of waste sealing sheet, polyethylene, municipal incineration</i>	<i>treatment of waste wood pole, chrome preserved, municipal incineration</i>
<i>treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration</i>	<i>treatment of spent antifreezer liquid, hazardous waste incineration</i>
<i>treatment of waste graphical paper, municipal incineration</i>	<i>treatment of refinery sludge, hazardous waste incineration</i>
<i>treatment of waste packaging paper, municipal incineration</i>	<i>treatment of municipal solid waste, incineration</i>
<i>treatment of waste emulsion paint, municipal incineration</i>	<i>treatment of used capacitor, to hazardous waste incineration</i>
<i>treatment of waste bitumen sheet, municipal incineration</i>	<i>treatment of waste plastic, industrial electronics, municipal incineration</i>
<i>treatment of spent solvent mixture, hazardous waste incineration</i>	<i>treatment of residue from mechanical treatment, laser printer, municipal waste incineration</i>
<i>treatment of waste glass, municipal incineration</i>	<i>treatment of residue from mechanical treatment, liquid crystal display, municipal waste incineration</i>
<i>treatment of waste polyvinylfluoride, municipal incineration</i>	<i>treatment of residue from shredder fraction from manual dismantling, municipal waste incineration</i>
<i>treatment of waste polystyrene, municipal incineration</i>	<i>treatment of steel in car shredder residue, municipal incineration</i>
<i>treatment of waste expanded polystyrene, municipal incineration</i>	<i>treatment of scrap steel, municipal incineration</i>
<i>treatment of scrap aluminium, municipal incineration</i>	<i>treatment of waste wire plastic, municipal incineration</i>
<i>treatment of waste textile, soiled, municipal incineration</i>	<i>treatment of residue from mechanical treatment, laptop computer, municipal waste incineration</i>
<i>treatment of meat and bone meal, municipal incineration</i>	<i>treatment of residue from mechanical treatment, IT accessory, municipal waste incineration</i>
<i>treatment of waste paint, municipal incineration</i>	<i>treatment of lead in car shredder residue, municipal incineration</i>
<i>treatment of waste sealing sheet, polyvinylchloride, municipal incineration</i>	<i>treatment of coating from waste cathode ray tube display, municipal waste incineration</i>
<i>treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration</i>	<i>treatment of zinc in car shredder residue, municipal incineration</i>
<i>treatment of lignite ash, municipal incineration</i>	<i>treatment of scrap copper, municipal incineration</i>
<i>treatment of waste building wood, chrome preserved, municipal incineration</i>	

Tableau 65 : Mode de valorisation énergétique dans les unités de valorisation des ordures ménagères en France

	Valorisation électrique		Valorisation thermique		Cogénération	
	France ³	Échantillon de l'enquête	France	Échantillon de l'enquête	France	Échantillon de l'enquête
Nombre d'installations	26	19	28	10	51	31
Tonnages incinérés	41%	27%	9%	8%	50%	66%

Source : enquête AMORCE 2011 Performances et recettes des Unités de valorisation énergétique des ordures ménagères, p. 7

Disponibles sur le site de l'association AMORCE :

<http://www.amorce.asso.fr/fr/espace-adherents/publications/rdc/valorisation-energetique/dt-40-rce13-performances-et-recettes-des-unites-de-valorisation-energetique-des-ordures-menageres/>

Tableau 66 : Impacts environnementaux de l'incinération des déchets, selon le type de déchet incinéré, base ecoinvent v3

Impacts par kg incinéré	Ressources abiotiques	Dommages à la biodiversité	Acidification	Déchets inertes	Odeur	Ozone photochimique	Énergie primaire	Eutrophisation	Déchets radioactifs	Consommation d'eau	Toxicité humaine	Potentiel de réchauffement global
Unité de l'impact	KgSbeq	PDF.m ² .an	kgSO ₂ eq	T	Mm ³	kgC ₂ H ₄ eq	MJ	kgPO ₄ -	Dm ³	L	DALYs	kgCO ₂ eq
Déchets organiques	1,29E-04	6,39E-03	2,50E-04	1,98E-01	3,16E+02	5,92E-06	2,75E-01	2,21E-04	7,10E-12	1,05E+00	1,70E-07	2,89E-02
Déchets municipaux solides (moyenne)	2,1E-04	1,4E-01	3,3E-04	2,8E-01	5,0E+02	8,2E-06	4,4E-01	2,1E-04	1,1E-11	1,6E+00	3,1E-07	5,3E-01
Bois de construction, traité au chrome	5,7E-05	5,5E-02	3,0E-04	2,1E-02	1,6E+02	3,3E-06	1,2E-01	7,8E-05	3,1E-12	1,1E+00	7,8E-08	1,1E-02
Polystyrène expansé	8,4E-05	2,0E-02	3,5E-04	5,3E-02	2,0E+02	1,0E-05	1,8E-01	8,3E-05	6,4E-12	1,1E+00	8,6E-07	3,1E+00
Carton d'emballage	1,0E-04	1,4E-02	4,1E-04	1,2E-01	2,3E+02	5,2E-06	2,2E-01	1,2E-04	9,0E-12	1,2E+00	2,2E-07	2,3E-02
Peinture	1,0E-04	3,3E-02	3,2E-04	6,7E-02	2,3E+02	1,1E-05	2,1E-01	7,0E-05	9,2E-12	1,2E+00	7,3E-07	2,4E+00
Mélange de plastiques	2,6E-04	4,6E-02	6,1E-04	5,9E-02	4,1E+02	1,8E-05	5,7E-01	1,8E-04	4,7E-11	1,3E+00	7,7E-07	2,3E+00
PE	7,84E-05	8,92E-03	3,24E-04	4,22E-02	1,89E+02	1,02E-05	1,66E-01	7,45E-05	6,40E-12	1,11E+00	8,27E-07	2,995E+00
Polystyrène	7,8E-05	2,0E-02	3,4E-04	4,2E-02	1,9E+02	1,0E-05	1,6E-01	8,1E-05	6,0E-12	1,1E+00	8,6E-07	3,2E+00
Polyurethane	4,4E-04	6,1E-02	2,0E-03	6,6E-02	7,2E+02	2,4E-05	9,7E-01	7,8E-04	6,5E-11	1,4E+00	9,9E-07	2,5E+00
PVC	2,5E-03	4,4E-02	2,6E-03	4,2E-01	3,1E+03	1,1E-04	5,6E+00	8,8E-04	5,9E-10	3,6E+00	1,0E-06	2,1E+00
Textiles souillés (huiles)	2,9E-04	2,4E-02	2,2E-03	7,5E-02	5,7E+02	1,5E-05	6,4E-01	8,4E-04	2,6E-11	1,2E+00	3,2E-07	1,3E-01
Câble plastique	3,0E-03	2,9E+00	3,1E-03	4,0E-01	3,7E+03	1,3E-04	6,8E+00	1,1E-03	7,2E-10	4,1E+00	1,3E-06	2,4E+00
Bois non traité	5,5E-05	3,7E-03	3,0E-04	1,7E-02	1,6E+02	3,2E-06	1,1E-01	7,8E-05	2,9E-12	1,1E+00	7,8E-08	1,0E-02

Tableau 67 : Impacts environnementaux générés par la production d'électricité en considérant un mix de production moyen ou un mix marginal, calcul de l'auteur à partir de la base ecoinvent v3

/kWh distribué	Ressources abiotiques	Dommages à la biodiversité	Acidification	Déchets inertes	Odeur	Ozone photochimique	Énergie primaire	Eutrophication	Déchets radioactifs	Consommation d'eau	Toxicité humaine	Potentiel de réchauffement global
	KgSbeq	PDF.m ² .an	kgSO ₂ eq	T	Mm ³	kgC ₂ H ₄ eq	MJ	kgPO ₄ -	Dm ³	L	DALYs	kgCO ₂ eq
Mix moyen	6,7E-04	3,7E-02	5,0E-04	7,6E-02	9,9E+02	3,4E-05	1,3E+01	1,0E-03	5,9E-08	6,0E+00	2,7E-07	9,1E-02
Mix marginal	5,9E-03	4,8E-02	4,0E-03	2,3E-01	2,3E+03	1,8E-04	1,4E+01	5,5E-04	2,4E-08	3,8E+00	6,8E-07	7,2E-01

Tableau 68 : Bilan environnemental par kg de déchets incinéré avec récupération d'énergie en considérant le gaz comme combustible évité (pertes de distribution 12 %, rendement 53,9%), calcul de l'auteur à partir de la base ecoinvent v3

Bilan par kg incinéré avec impacts évités Gaz	Ressources abiotiques	Dommages à la biodiversité	Acidification	Déchets inertes	Odeur	Ozone photochimique	Énergie primaire	Eutrophication	Déchets radioactifs	Consommation d'eau	Toxicité humaine	Potentiel de réchauffement global
Unité de l'impact	KgSbeq	PDF.m ² .an	kgSO ₂ e _q	T	Mm3	kgC ₂ H ₄ eq	MJ	kgPO ₄ -	Dm3	L	DALYs	kgCO ₂ eq
Bois de construction, traité au chrome	-3,8E-03	5,2E-02	-2,6E-04	1,5E-03	-1,0E+04	-4,1E-05	-7,9E+00	-5,7E-05	-4,1E-09	8,5E-01	1,9E-07	1,0E+00
Bois non traité	-3,8E-03	5,3E-04	-2,7E-04	-2,0E-03	-1,0E+04	-4,1E-05	-7,9E+00	-5,7E-05	-4,1E-09	8,4E-01	1,9E-07	1,0E+00
Câble plastique	-4,2E-03	2,9E+00	2,1E-03	3,7E-01	-1,6E+04	5,1E-05	-8,1E+00	8,0E-04	-6,8E-09	3,6E+00	9,0E-07	1,6E+00
Carton d'emballage	-4,3E-03	1,0E-02	-2,3E-04	9,6E-02	-1,2E+04	-4,5E-05	-8,9E+00	-2,9E-05	-4,6E-09	8,8E-01	3,1E-07	9,7E-01
Déchets municipaux solides (moyenne)	-3,0E-03	1,3E-01	-1,4E-04	2,7E-01	-8,4E+03	-2,9E-05	-6,3E+00	1,0E-04	-3,4E-09	1,4E+00	3,1E-07	9,0E-01
Mélange de plastiques	-8,3E-03	3,9E-02	-6,3E-04	1,6E-02	-2,3E+04	-7,9E-05	-1,7E+01	-1,2E-04	-8,9E-09	7,5E-01	3,5E-07	1,3E+00
Peinture	-2,7E-03	3,1E-02	-9,1E-05	5,3E-02	-7,5E+03	-2,1E-05	-5,6E+00	-2,8E-05	-2,9E-09	9,9E-01	5,9E-07	2,1E+00
Polystyrène	-1,1E-02	1,1E-02	-1,2E-03	-1,1E-02	-2,9E+04	-1,1E-04	-2,2E+01	-2,9E-04	-1,1E-08	4,5E-01	3,3E-07	1,9E+00
Polystyrène expansé	-8,8E-03	1,2E-02	-9,5E-04	8,9E-03	-2,4E+04	-9,1E-05	-1,8E+01	-2,3E-04	-9,3E-09	5,7E-01	4,2E-07	2,1E+00
Polyurethane	-8,0E-03	5,4E-02	8,0E-04	2,4E-02	-2,3E+04	-7,2E-05	-1,7E+01	4,9E-04	-8,8E-09	8,4E-01	5,7E-07	1,5E+00
PVC	-3,7E-03	3,9E-02	1,7E-03	3,9E-01	-1,4E+04	4,0E-05	-7,3E+00	6,6E-04	-5,9E-09	3,2E+00	7,4E-07	1,4E+00
Déchets organiques	-1,1E-03	5,4E-03	2,50E-04	1,9E-01	-2,9E+03	-7,6E-06	-2,2E+00	1,8E-04	-1,2E-09	9,7E-01	2,2E-07	4,1E-01
PE	-1,2E-02	-7,5E-04	-1,4E-03	-1,6E-02	-3,2E+04	-1,2E-04	-2,4E+01	-3,3E-04	-1,2E-08	3,8E-01	2,5E-07	1,6E+00
Textiles souillés	-3,7E-03	2,1E-02	1,6E-03	5,6E-02	-1,0E+04	-3,0E-05	-7,7E+00	7,0E-04	-4,2E-09	9,8E-01	3,8E-07	9,1E-01

Tableau 69 : Bilan environnemental par kg de déchets incinéré en considérant le fioul comme combustible évité (pertes de distribution 12 %, rendement 53,9%), calcul de l'auteur à partir de la base ecoinvent v3

Bilan par kg incinéré avec impacts évités Fioul	Ressources abiotiques	Dommages à la biodiversité	Acidification	Déchets inertes	Odeur	Ozone photochimique	Énergie primaire	Eutrophication	Déchets radioactifs	Consommation d'eau	Toxicité humaine	Potentiel de réchauffement global
Unité de l'impact	KgSbeq	PDF.m ² .an	kgSO ₂ e _q	T	Mm ³	kgC ₂ H ₄ eq	MJ	kgPO ₄ -	Dm ³	L	DALYs	kgCO ₂ eq
Bois de construction, traité au Chrome	-3,7E-03	1,2E-02	-3,6E-03	7,9E-03	-4,1E+03	-1,8E-04	-8,5E+00	-1,3E-04	-2,4E-08	4,8E-01	-8,3E-08	8,4E-01
Bois non traité	-3,7E-03	-3,9E-02	-3,6E-03	4,4E-03	-4,1E+03	-1,8E-04	-8,5E+00	-1,3E-04	-2,4E-08	4,8E-01	-8,2E-08	8,5E-01
Câble plastique	-4,0E-03	2,8E+00	-4,1E-03	3,8E-01	-4,2E+03	-2,1E-04	-9,2E+00	6,7E-04	-4,3E-08	2,9E+00	3,9E-07	1,2E+00
Carton d'emballage	-4,2E-03	-3,6E-02	-4,0E-03	1,0E-01	-4,6E+03	-2,0E-04	-9,6E+00	-1,1E-04	-2,7E-08	4,6E-01	-1,0E-09	7,8E-01
Déchets dangereux	-2,9E-03	1,0E-01	-2,9E-03	2,7E-01	-3,1E+03	-1,4E-04	-6,8E+00	4,1E-05	-2,0E-08	1,1E+00	8,3E-08	7,6E-01
Déchets municipaux solides (moyenne)	-8,0E-03	-5,0E-02	-7,9E-03	3,0E-02	-9,0E+03	-3,9E-04	-1,8E+01	-2,7E-04	-5,2E-08	-4,9E-02	-2,6E-07	9,8E-01
Mélange de plastiques	-2,6E-03	2,0E-03	-2,5E-03	5,8E-02	-2,9E+03	-1,2E-04	-6,0E+00	-7,9E-05	-1,7E-08	7,3E-01	3,9E-07	1,9E+00
Peinture	-1,0E-02	-1,0E-01	-1,0E-02	6,3E-03	-1,2E+04	-5,0E-04	-2,4E+01	-4,9E-04	-6,5E-08	-5,6E-01	-4,3E-07	1,5E+00
Peinture vers déchets dangereux	-8,6E-03	-8,0E-02	-8,6E-03	2,4E-02	-9,6E+03	-4,1E-04	-2,0E+01	-3,9E-04	-5,4E-08	-2,6E-01	-2,2E-07	1,7E+00
Polystyrène	-7,8E-03	-3,4E-02	-6,5E-03	3,8E-02	-8,6E+03	-3,8E-04	-1,8E+01	3,3E-04	-5,2E-08	4,1E-02	-3,5E-08	1,1E+00
Polystyrène expansé	-3,6E-03	-2,5E-02	-3,7E-03	4,0E-01	-3,8E+03	-1,8E-04	-8,3E+00	5,4E-04	-3,7E-08	2,6E+00	3,0E-07	1,1E+00
Polyuréthane	-1,0E-03	-6,9E-03	-9,4E-04	1,9E-01	-9,9E+02	-5,0E-05	-2,4E+00	1,6E-04	-7,2E-09	8,6E-01	1,4E-07	3,6E-01
PVC	-1,1E-02	-1,2E-01	-1,1E-02	3,1E-03	-1,3E+04	-5,5E-04	-2,6E+01	-5,5E-04	-7,1E-08	-7,2E-01	-5,9E-07	1,1E+00
Déchets organiques	-3,6E-03	-2,0E-02	-1,8E-03	6,2E-02	-3,8E+03	-1,7E-04	-8,3E+00	6,2E-04	-2,4E-08	6,0E-01	9,9E-08	7,4E-01
PE	-3,7E-03	1,2E-02	-3,6E-03	7,9E-03	-4,1E+03	-1,8E-04	-8,5E+00	-1,3E-04	-2,4E-08	4,8E-01	-8,3E-08	8,4E-01
Textiles souillés	-3,7E-03	-3,9E-02	-3,6E-03	4,4E-03	-4,1E+03	-1,8E-04	-8,5E+00	-1,3E-04	-2,4E-08	4,8E-01	-8,2E-08	8,5E-01

Tableau 70 : Bilan environnemental par kg de déchets incinéré en considérant qu'une production d'électricité moyenne par le réseau est évitée (6 % de pertes de distribution, rendement de 15,9 %), calcul de l'auteur à partir de la base ecoinvent v3

Bilan par kg incinéré avec impacts évités Électricité moyenne	Ressources abiotiques	Dommages à la biodiversité	Acidification	Déchets inertes	Odeur	Ozone photochimique	Énergie primaire	Eutrophication	Déchets radioactifs	Consommation d'eau	Toxicité humaine	Potentiel de réchauffement global
Unité de l'impact	KgSbeq	PDF.m ² .an	kgSO2eq	T	Mm3	kgC2H4eq	MJ	kgPO4-	Dm3	L	DALYs	kgCO2eq
Bois de construction, traité au chrome	-3,3E-04	3,4E-02	1,0E-05	-2,3E-02	-4,2E+02	-1,6E-05	-7,4E+00	-5,2E-04	-3,5E-08	-2,4E+00	2,3E-07	1,4E+00
Bois non traité	-3,3E-04	-1,8E-02	7,9E-06	-2,7E-02	-4,2E+02	-1,6E-05	-7,4E+00	-5,2E-04	-3,5E-08	-2,4E+00	2,3E-07	1,4E+00
Câble plastique	2,3E-03	2,9E+00	2,6E-03	3,2E-01	2,6E+03	9,6E-05	-7,1E+00	-4,9E-05	-6,3E-08	-2,5E+00	9,7E-07	2,3E+00
Carton d'emballage	-3,4E-04	-1,1E-02	8,6E-05	6,8E-02	-4,3E+02	-1,7E-05	-8,3E+00	-5,5E-04	-3,9E-08	-2,8E+00	3,5E-07	1,4E+00
Déchets dangereux	-1,2E-04	1,2E-01	8,5E-05	2,4E-01	1,6E+01	-8,1E-06	-5,8E+00	-2,8E-04	-2,9E-08	-1,3E+00	3,4E-07	1,2E+00
Déchets municipaux solides (moyenne)	-5,9E-04	-1,4E-03	-2,9E-05	-3,8E-02	-8,6E+02	-2,5E-05	-1,6E+01	-1,1E-03	-7,6E-08	-6,4E+00	4,3E-07	2,2E+00
Mélange de plastiques	-1,8E-04	1,8E-02	1,1E-04	3,5E-02	-1,9E+02	-3,1E-06	-5,2E+00	-3,6E-04	-2,5E-08	-1,4E+00	6,1E-07	2,3E+00
Peinture	-9,9E-04	-3,9E-02	-4,6E-04	-7,9E-02	-1,4E+03	-4,4E-05	-2,0E+01	-1,6E-03	-9,5E-08	-8,6E+00	4,3E-07	3,0E+00
Peinture vers déchets dangereux	-8,1E-04	-2,9E-02	-3,2E-04	-4,8E-02	-1,1E+03	-3,4E-05	-1,7E+01	-1,3E-03	-7,9E-08	-7,0E+00	5,0E-07	3,0E+00
Polystyrène	-4,1E-04	1,4E-02	1,4E-03	-3,0E-02	-5,5E+02	-1,9E-05	-1,5E+01	-5,2E-04	-7,6E-08	-6,3E+00	6,5E-07	2,3E+00
Polystyrène expansé	1,9E-03	1,0E-02	2,1E-03	3,5E-01	2,1E+03	7,9E-05	-6,4E+00	-8,2E-05	-5,5E-08	-2,1E+00	8,0E-07	2,0E+00
Polyuréthane	1,1E-05	-1,5E-04	1,6E-04	1,8E-01	1,4E+02	-5,5E-08	-2,0E+00	3,9E-05	-1,1E-08	-3,0E-02	2,3E-07	5,3E-01
PVC	-1,1E-03	-5,6E-02	-5,5E-04	-9,1E-02	-1,6E+03	-4,9E-05	-2,3E+01	-1,7E-03	-1,0E-07	-9,5E+00	3,6E-07	2,8E+00
Déchets organiques	-1,1E-04	2,3E-03	1,9E-03	3,0E-02	-2,6E+01	-5,2E-06	-7,1E+00	2,2E-04	-3,6E-08	-2,4E+00	4,2E-07	1,3E+00
PE	-3,3E-04	3,4E-02	1,0E-05	-2,3E-02	-4,2E+02	-1,6E-05	-7,4E+00	-5,2E-04	-3,5E-08	-2,4E+00	2,3E-07	1,4E+00
Textiles souillés	-3,3E-04	-1,8E-02	7,9E-06	-2,7E-02	-4,2E+02	-1,6E-05	-7,4E+00	-5,2E-04	-3,5E-08	-2,4E+00	2,3E-07	1,4E+00

Tableau 71 : Bilan environnemental par kg de déchets incinéré en considérant qu'une production d'électricité marginale par le réseau est évitée (6 % de pertes de distribution, rendement de 15,9 %), calcul de l'auteur à partir de la base ecoinvent v3

Bilan par kg incinéré avec impacts évités Électricité marginale	Ressources abiotiques	Dommages à la biodiversité	Acidification	Déchets inertes	Odeur	Ozone photochimique	Énergie primaire	Eutrophisation	Déchets radioactifs	Consommation d'eau	Toxicité humaine	Potentiel de réchauffement global
Unité de l'impact	KgSbeq	PDF.m ² .an	kgSO ₂ eq	T	Mm ³	kgC ₂ H ₄ eq	MJ	kgPO ₄ -	Dm ³	L	DALYs	kgCO ₂ eq
Bois de construction, traité au chrome	-3,4E-03	2,7E-02	-2,0E-03	-1,1E-01	-1,2E+03	-1,0E-04	-7,8E+00	-2,4E-04	-1,4E-08	-1,1E+00	-1,1E-08	1,0E+00
Bois non traité	-3,4E-03	-2,4E-02	-2,0E-03	-1,2E-01	-1,2E+03	-1,0E-04	-7,8E+00	-2,4E-04	-1,4E-08	-1,1E+00	-9,6E-09	1,1E+00
Câble plastique	-3,3E-03	2,9E+00	-1,2E-03	1,6E-01	1,2E+03	-6,0E-05	-7,9E+00	4,6E-04	-2,5E-08	-8,3E-02	5,2E-07	1,6E+00
Carton d'emballage	-3,8E-03	-1,8E-02	-2,3E-03	-3,2E-02	-1,3E+03	-1,1E-04	-8,8E+00	-2,4E-04	-1,6E-08	-1,4E+00	8,1E-08	1,0E+00
Déchets dangereux	-2,6E-03	1,1E-01	-1,6E-03	1,7E-01	-6,3E+02	-7,8E-05	-6,1E+00	-5,6E-05	-1,2E-08	-2,3E-01	1,4E-07	9,3E-01
Déchets municipaux solides (moyenne)	-7,2E-03	-1,6E-02	-4,5E-03	-2,3E-01	-2,6E+03	-2,1E-04	-1,7E+01	-5,3E-04	-3,1E-08	-3,6E+00	-9,9E-08	1,4E+00
Mélange de plastiques	-2,4E-03	1,3E-02	-1,4E-03	-2,9E-02	-7,5E+02	-6,4E-05	-5,5E+00	-1,6E-04	-1,0E-08	-4,5E-01	4,4E-07	2,1E+00
Peinture	-9,3E-03	-5,8E-02	-6,1E-03	-3,2E-01	-3,5E+03	-2,8E-04	-2,2E+01	-8,1E-04	-3,9E-08	-5,1E+00	-2,3E-07	2,0E+00
Peinture vers déchets dangereux	-7,8E-03	-4,5E-02	-5,0E-03	-2,5E-01	-2,9E+03	-2,3E-04	-1,8E+01	-6,6E-04	-3,2E-08	-4,0E+00	-5,0E-08	2,2E+00
Polystyrène	-7,0E-03	-6,7E-04	-3,1E-03	-2,2E-01	-2,2E+03	-2,0E-04	-1,6E+01	7,6E-05	-3,1E-08	-3,5E+00	1,2E-07	1,5E+00
Polystyrène expansé	-3,0E-03	-8,4E-04	-1,2E-03	2,1E-01	8,9E+02	-5,6E-05	-7,1E+00	3,6E-04	-2,2E-08	-3,5E-02	4,1E-07	1,4E+00
Polyuréthane	-9,2E-04	-2,2E-03	-4,7E-04	1,6E-01	-9,9E+01	-2,6E-05	-2,1E+00	1,2E-04	-4,3E-09	3,6E-01	1,6E-07	4,2E-01
PVC	-1,0E-02	-7,7E-02	-6,8E-03	-3,6E-01	-3,9E+03	-3,0E-04	-2,4E+01	-9,0E-04	-4,3E-08	-5,7E+00	-3,7E-07	1,7E+00
Déchets organiques	-3,2E-03	-4,7E-03	-2,4E-04	-6,1E-02	-8,3E+02	-9,2E-05	-7,5E+00	5,0E-04	-1,5E-08	-1,1E+00	1,7E-07	9,5E-01
PE	-3,4E-03	2,7E-02	-2,0E-03	-1,1E-01	-1,2E+03	-1,0E-04	-7,8E+00	-2,4E-04	-1,4E-08	-1,1E+00	-1,1E-08	1,0E+00
Textiles souillés	-3,4E-03	-2,4E-02	-2,0E-03	-1,2E-01	-1,2E+03	-1,0E-04	-7,8E+00	-2,4E-04	-1,4E-08	-1,1E+00	-9,6E-09	1,1E+00

Tableau 72 : Bilan environnemental par kg de déchets incinéré en considérant de la cogénération : production d'électricité marginale et chaleur fioul évitées (6 % de pertes de distribution pour l'électricité, rendement du turboalternateur de 11,4 % et chaleur, fioul, 12 % pertes de distribution, rendement chaudière de 27,9 %), calcul de l'auteur à partir de la base ecoinvent v3

Bilan par kg incinéré avec impacts évités cogénération	Ressources abiotiques	Dommages à la biodiversité	Acidification	Déchets inertes	Odeur	Ozone photochimique	Énergie primaire	Eutrophisation	Déchets radioactifs	Consommation d'eau	Toxicité humaine	Potentiel de réchauffement global
Unité de l'impact	KgSbeq	PDF.m ² .an	kgSO2eq	T	Mm3	kgC2H4eq	MJ	kgPO4-	Dm3	L	DALYs	kgCO2eq
Bois de construction, traité au chrome	-4,8E-03	8,0E-03	-3,8E-03	-8,8E-02	-3,4E+03	-1,8E-04	-1,1E+01	-2,9E-04	-2,5E-08	-9,7E-01	-1,9E-07	7,8E-01
Bois non traité	-4,8E-03	-4,3E-02	-3,8E-03	-9,1E-02	-3,4E+03	-1,8E-04	-1,1E+01	-2,9E-04	-2,5E-08	-9,7E-01	-1,9E-07	7,9E-01
Câble plastique	-5,9E-03	2,8E+00	-4,4E-03	2,0E-01	-2,9E+03	-2,1E-04	-1,4E+01	3,7E-04	-4,5E-08	2,4E-01	1,9E-07	1,1E+00
Carton d'emballage	-5,4E-03	-4,0E-02	-4,2E-03	-5,3E-03	-3,8E+03	-2,1E-04	-1,2E+01	-2,9E-04	-2,8E-08	-1,2E+00	-1,2E-07	7,0E-01
Déchets dangereux	-3,8E-03	9,7E-02	-3,1E-03	1,9E-01	-2,5E+03	-1,5E-04	-8,8E+00	-9,3E-05	-2,1E-08	-8,0E-02	-7,8E-09	7,1E-01
Déchets municipaux solides (moyenne)	-1,0E-02	-5,8E-02	-8,4E-03	-1,8E-01	-7,4E+03	-3,9E-04	-2,4E+01	-6,3E-04	-5,4E-08	-3,2E+00	-5,0E-07	8,4E-01
Mélange de plastiques	-3,4E-03	-6,9E-04	-2,6E-03	-1,2E-02	-2,3E+03	-1,2E-04	-7,8E+00	-2,0E-04	-1,8E-08	-3,3E-01	3,1E-07	1,9E+00
Peinture	-1,3E-02	-1,1E-01	-1,1E-02	-2,6E-01	-9,6E+03	-5,1E-04	-3,0E+01	-9,3E-04	-6,8E-08	-4,6E+00	-7,3E-07	1,3E+00
Peinture vers déchets dangereux	-1,1E-02	-8,8E-02	-9,0E-03	-2,0E-01	-7,9E+03	-4,2E-04	-2,5E+01	-7,6E-04	-5,7E-08	-3,6E+00	-4,7E-07	1,6E+00
Polystyrène	-1,0E-02	-4,2E-02	-6,9E-03	-1,7E-01	-7,0E+03	-3,8E-04	-2,3E+01	-2,2E-05	-5,4E-08	-3,1E+00	-2,7E-07	9,6E-01
Polystyrène expansé	-5,3E-03	-3,1E-02	-4,0E-03	2,5E-01	-2,6E+03	-1,9E-04	-1,2E+01	2,9E-04	-3,9E-08	2,4E-01	1,2E-07	1,0E+00
Polyuréthane	-1,3E-03	-8,0E-03	-1,0E-03	1,7E-01	-7,7E+02	-5,1E-05	-3,1E+00	1,1E-04	-7,5E-09	4,2E-01	1,0E-07	3,4E-01
PVC	-1,5E-02	-1,3E-01	-1,2E-02	-2,9E-01	-1,1E+04	-5,6E-04	-3,3E+01	-1,0E-03	-7,5E-08	-5,1E+00	-9,2E-07	9,2E-01
Déchets organiques	-4,7E-03	-2,4E-02	-2,0E-03	-3,7E-02	-3,1E+03	-1,8E-04	-1,1E+01	4,6E-04	-2,5E-08	-9,0E-01	-1,3E-08	6,8E-01
PE	-4,8E-03	8,0E-03	-3,8E-03	-8,8E-02	-3,4E+03	-1,8E-04	-1,1E+01	-2,9E-04	-2,5E-08	-9,7E-01	-1,9E-07	7,8E-01
Textiles souillés	-4,8E-03	-4,3E-02	-3,8E-03	-9,1E-02	-3,4E+03	-1,8E-04	-1,1E+01	-2,9E-04	-2,5E-08	-9,7E-01	-1,9E-07	7,9E-01

Tableau 73: Bilan environnemental par kg de déchets incinéré en considérant de la cogénération : production d'électricité moyenne et chaleur gaz évitées (6 % de pertes de distribution pour l'électricité, rendement du turboalternateur de 14,4 % et chaleur, gaz, 12 % pertes de distribution, rendement chaudière de 70,9 %, calcul de l'auteur à partir de la base ecoinvent v3

Bilan par kg incinéré avec impacts évités cogénération	Ressources abiotiques	Dommages à la biodiversité	Acidification	Déchets inertes	Odeur	Ozone photochimique	Énergie primaire	Eutrophisation	Déchets radioactifs	Consommation d'eau	Toxicité humaine	Potentiel de réchauffement global
Unité de l'impact	KgSbeq	PDF.m ² .an	kgSO ₂ eq	T	Mm ³	kgC ₂ H ₄ eq	MJ	kgPO ₄ -	Dm ³	L	DALYs	kgCO ₂ eq
Bois de construction, traité au chrome	-2,5E-03	3,7E-02	-2,5E-04	-2,4E-02	-6,5E+03	-3,7E-05	-1,0E+01	-4,5E-04	-2,9E-08	-1,7E+00	1,5E-07	1,2E+00
Bois non traité	-2,5E-03	-1,4E-02	-2,5E-04	-2,8E-02	-6,5E+03	-3,8E-05	-1,0E+01	-4,6E-04	-2,9E-08	-1,7E+00	1,5E-07	1,2E+00
Câble plastique	-1,8E-03	2,9E+00	2,1E-03	3,2E-01	-8,7E+03	5,7E-05	-1,3E+01	6,5E-05	-5,3E-08	-1,2E+00	8,3E-07	1,8E+00
Carton d'emballage	-2,8E-03	-7,1E-03	-2,1E-04	6,7E-02	-7,4E+03	-4,1E-05	-1,2E+01	-4,8E-04	-3,3E-08	-2,1E+00	2,7E-07	1,1E+00
Déchets dangereux	-1,9E-03	1,2E-01	-1,3E-04	2,4E-01	-5,1E+03	-2,6E-05	-8,3E+00	-2,3E-04	-2,4E-08	-7,2E-01	2,8E-07	1,0E+00
Déchets municipaux solides (moyenne)	-5,4E-03	5,6E-03	-6,1E-04	-4,0E-02	-1,4E+04	-7,2E-05	-2,2E+01	-9,9E-04	-6,3E-08	-4,9E+00	2,6E-07	1,7E+00
Mélange de plastiques	-1,8E-03	2,0E-02	-8,3E-05	3,4E-02	-4,6E+03	-1,8E-05	-7,3E+00	-3,2E-04	-2,1E-08	-8,8E-01	5,6E-07	2,2E+00
Peinture	-7,0E-03	-3,0E-02	-1,2E-03	-8,2E-02	-1,8E+04	-1,0E-04	-2,9E+01	-1,4E-03	-7,9E-08	-6,7E+00	2,2E-07	2,3E+00
Peinture vers déchets dangereux	-5,8E-03	-2,2E-02	-9,2E-04	-5,0E-02	-1,5E+04	-8,3E-05	-2,4E+01	-1,1E-03	-6,6E-08	-5,4E+00	3,3E-07	2,4E+00
Polystyrène	-5,2E-03	2,1E-02	8,2E-04	-3,2E-02	-1,4E+04	-6,5E-05	-2,2E+01	-3,9E-04	-6,3E-08	-4,8E+00	4,8E-07	1,8E+00
Polystyrène expansé	-1,6E-03	1,5E-02	1,7E-03	3,5E-01	-7,7E+03	4,5E-05	-1,1E+01	1,7E-05	-4,6E-08	-9,8E-01	6,8E-07	1,6E+00
Polyuréthane	-6,6E-04	8,3E-04	8,1E-05	1,8E-01	-1,7E+03	-6,6E-06	-2,9E+00	5,8E-05	-8,8E-09	1,8E-01	2,1E-07	4,5E-01
PVC	-7,7E-03	-4,6E-02	-1,3E-03	-9,4E-02	-2,0E+04	-1,1E-04	-3,1E+01	-1,5E-03	-8,7E-08	-7,4E+00	1,3E-07	2,1E+00
Déchets organiques	-2,4E-03	5,6E-03	1,6E-03	2,9E-02	-6,3E+03	-2,7E-05	-1,0E+01	2,9E-04	-3,0E-08	-1,7E+00	3,4E-07	1,1E+00
PE	-2,5E-03	3,7E-02	-2,5E-04	-2,4E-02	-6,5E+03	-3,7E-05	-1,0E+01	-4,5E-04	-2,9E-08	-1,7E+00	1,5E-07	1,2E+00
Textiles souillés (huiles)	-2,5E-03	-1,4E-02	-2,5E-04	-2,8E-02	-6,5E+03	-3,8E-05	-1,0E+01	-4,6E-04	-2,9E-08	-1,7E+00	1,5E-07	1,2E+00

Annexe P. Parc roulant des véhicules particuliers

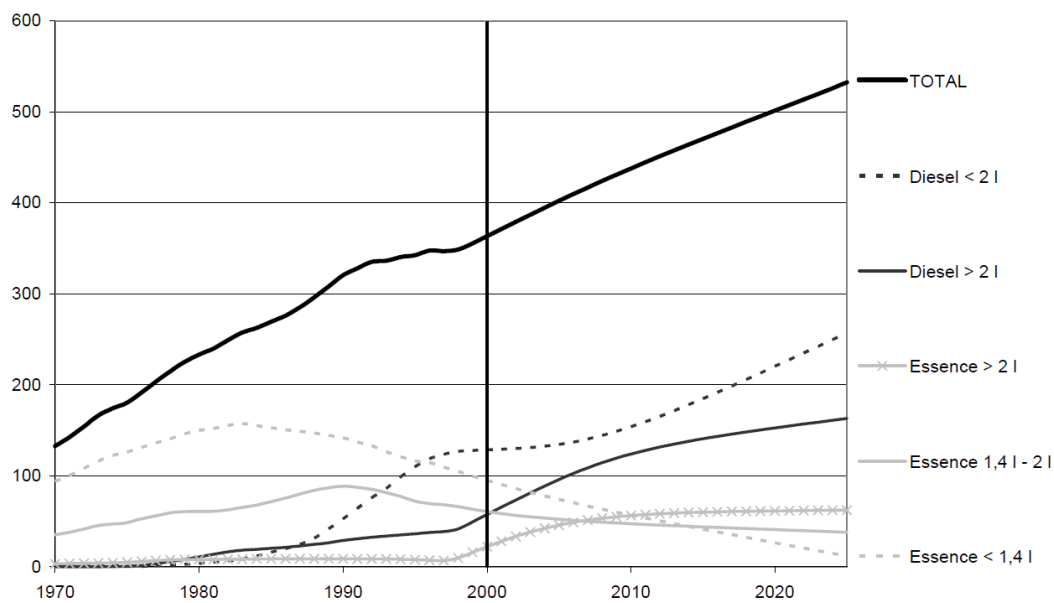


Figure 198 : Parc roulant des véhicules particuliers 1970-2025 (milliards de km), Hugrel et Joumard (2004, p. 25)

Annexe Q. Caractérisation des déchets

Production d'ordures ménagères résiduelles par habitant : comparaison 1993 et 2007 - en kg/hab/an

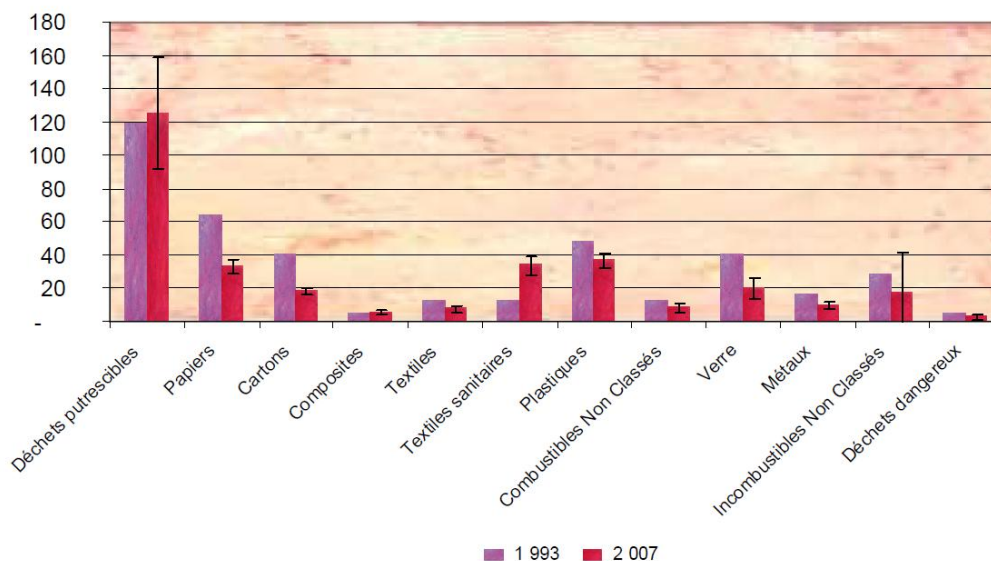


Figure 199 : Caractérisation des ordures ménagères résiduelles, campagne MODECOM, Ademe 2007

Tableau 74: Caractérisation des ordures ménagères résiduelles et regroupement par catégories utilisées dans l'étude de cas

	kg/hab	%	Regroupement
Putrescibles	125	39	Déchets organiques
Papiers	33	10	Papiers/Cartons
Cartons	18	6	Papiers/Cartons
Composites	5	1	Autres
Textiles	8	2	Textiles
Textiles sanitaires	34	11	Textiles
Plastiques	38	12	Plastiques
CNC	9	3	Autres
Verre	20	6	Verre
Métaux	9	3	Métaux
INC	17	5	Autres
Dangereux	3	1	Autres

Tableau 75 : Quantitatif des flux de déchet par usage, type de déchet et filière de traitement

LOGEMENTS	m ² SHON	33 124	Traitement
Ordures ménagères résiduelles	t/an	299,1	Incinération
Verre	t/an	25,4	Centre tri
Emballages/JRM	t/an	43,2	Centre tri
Biodéchet	t/an	73,5	Compostage
Encombrants	t/an	24,5	ISDND
Déchets dangereux des ménages	t/an	0,0	-
Apport déchèterie	t/an	141,7	Déchèterie
TOTAL DECHET DES MENAGES	t/an	607	
BUREAUX	m ² SHON	44 758	
Papier	t/an	173,4	Centre tri
Déchets recyclables	t/an	44,8	Centre tri
Résiduel	t/an	33,6	Incinération
TOTAL DECHETS BUREAUX	t/an	252	
EQUIPEMENTS	m ² SHON	14239	
TOTAL DECHETS EQUIPEMENTS	t/an	142	Incinération
COMMERCES	m ² SHON	3 829	
Verre	t/an	3,8	Centre tri
Métaux	t/an	5,0	Centre tri
Plastiques	t/an	10,7	Centre tri
Caoutchouc	t/an	0,2	Centre tri
Textile	t/an	0,0	Centre tri
Papier et carton	t/an	144,4	Centre tri
Bois	t/an	12,2	Centre tri
Mélange	t/an	179,7	Incinération
TOTAL DECHETS COMMERCES	t/an	356	
DECHETS URBAINS	m ² SHON	9 546	
Déchets verts	t/an	17,8	Compostage
Déchets de balayage	t/an	7,7	Incinération
Métaux	t/an	0,0	Centre tri
Bois	t/an	0,9	Incinération
Gravats	t/an	0,2	ISDND
Tout venant	t/an	22,9	Centre tri
TOTAL DECHETS URBAINS	t/an	50	
TOTAL	t/an	1 407	

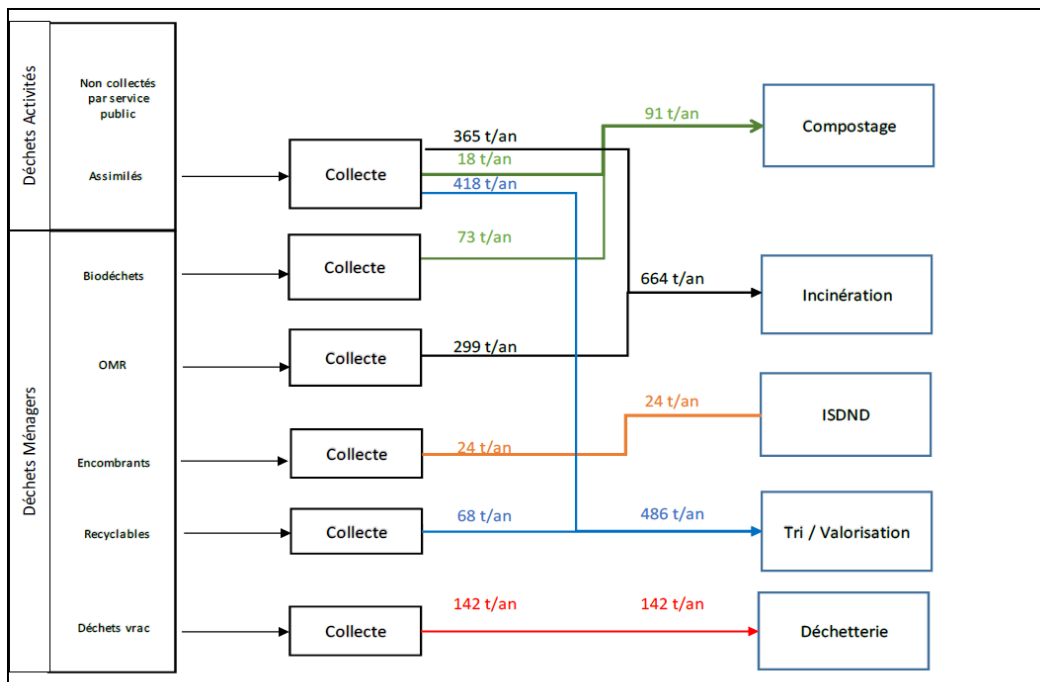


Figure 8 : FLUX DE DECHETS GENERES PAR LE PROJET D'ETUDES ET TRAITEMENTS ASSOCIES

Figure 200 : Synoptique du traitement des déchets, étude de cas, source : Julien Grimaud, Efficacy

Annexe R. Informations supplémentaires, transport

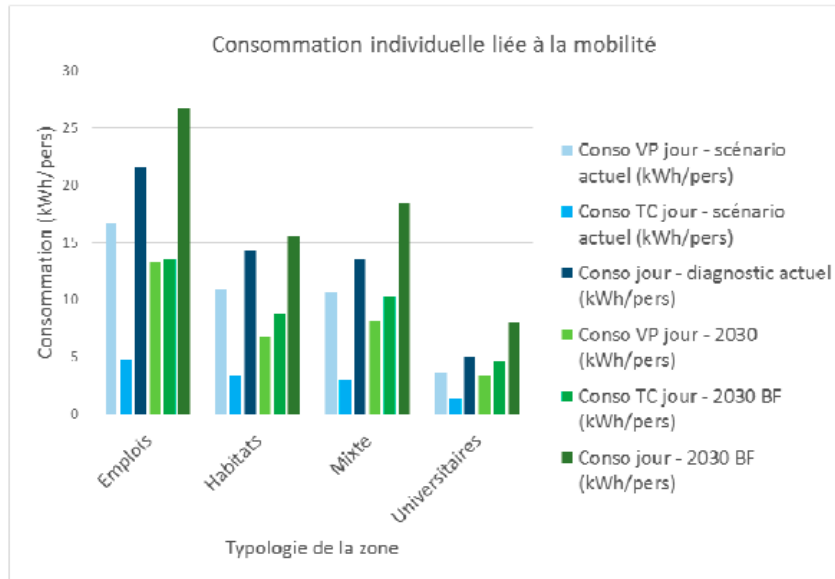
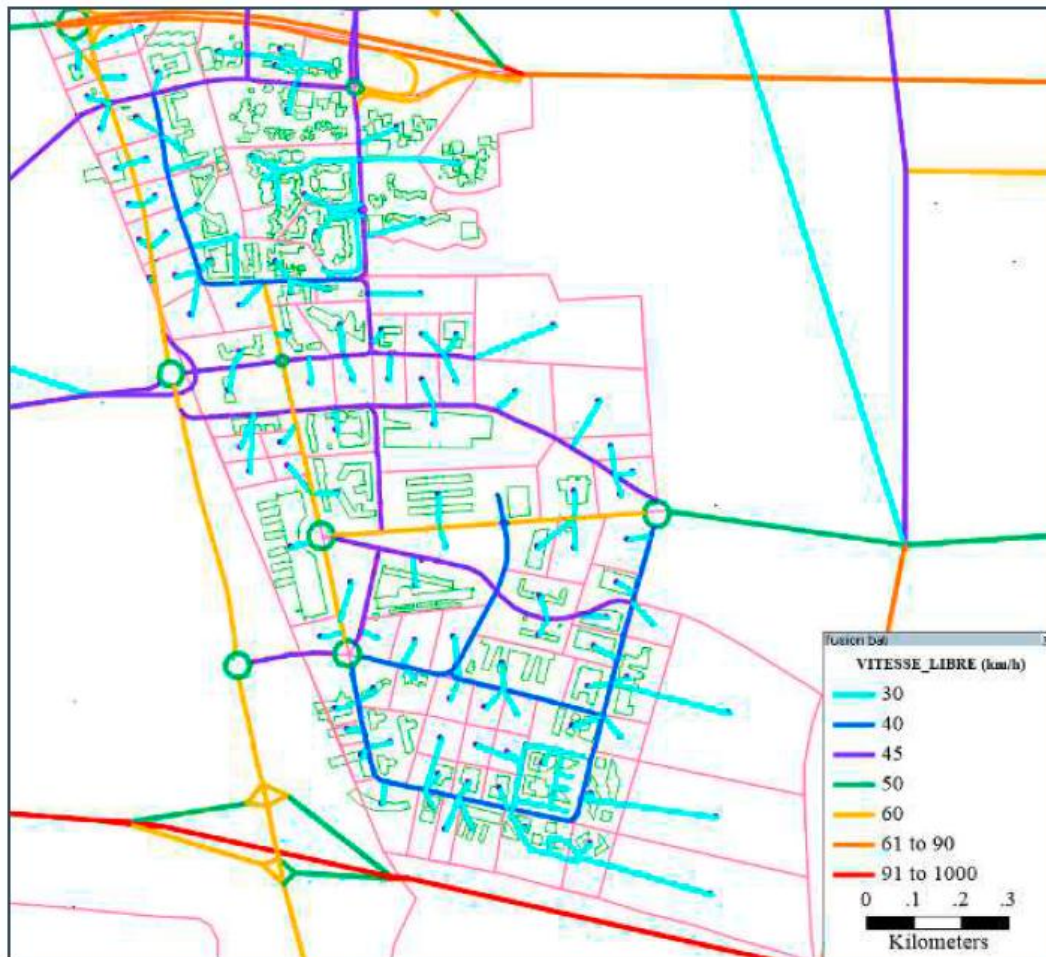


Figure 201 : Consommation individuelle liée à la mobilité, par typologie



Vitesse libre de nouveaux tronçons de la CDE

Figure 202 : Capacité et vitesse libre des nouveaux tronçons de la Cité Descartes, CDE (Vanhille, 2015)

Annexe S. Résultats détaillés : Transport

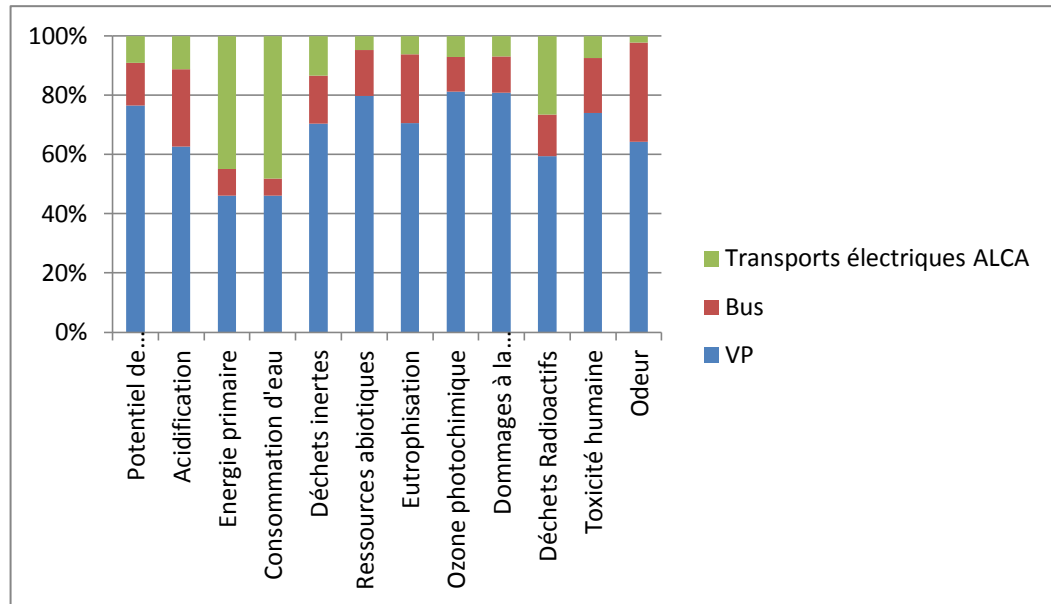


Figure 203: Analyse de contribution par mode de transport, en considérant un mix électrique moyen pour les transports électriques

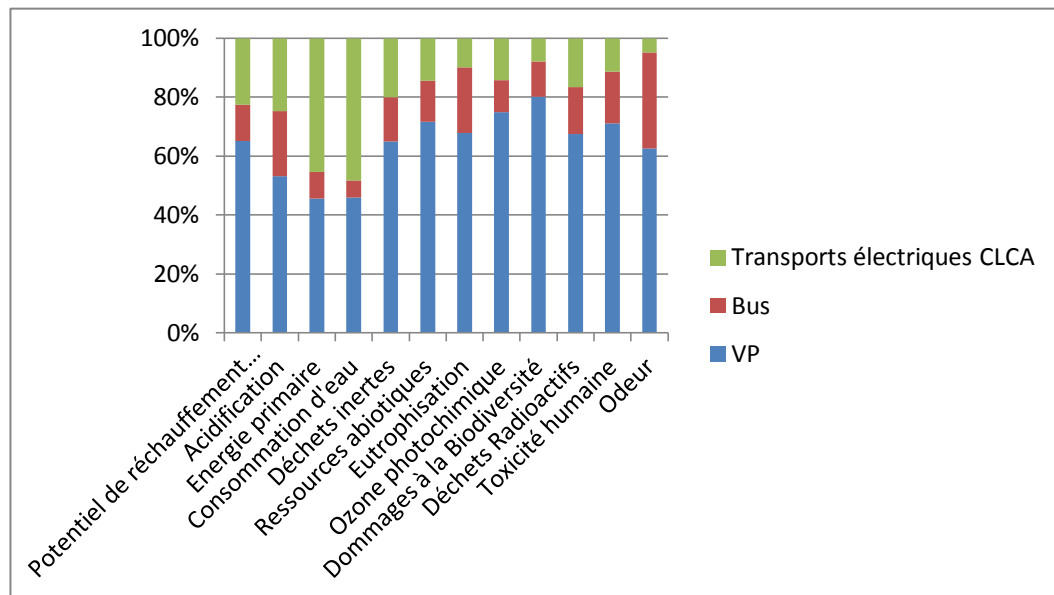


Figure 204 : Analyse de contribution par mode de transport, en considérant un mix électrique marginal pour les transports électriques

Annexe T. Résultats détaillés, prospective

Tableau 76 : Résultats ACVC-P prospective (matériaux+énergie), par usager, par an en fonction des scénarios prospectifs

	BBC - A1	BBC - A2	BBC - B1	BBC - B2
Effet de serre (100 ans) (kgCO2 eq.)	3,3E+02	3,2E+02	2,4E+02	2,4E+02
Acidification (kg SO2 eq.)	1,4E+00	1,3E+00	1,1E+00	1,1E+00
Demande cumulative d'énergie (GJ)	5,1E+00	4,9E+00	5,0E+00	4,9E+00
Eau utilisée (m³)	9,7E-01	9,2E-01	1,2E+00	1,1E+00
Déchets produits (t)	1,8E+02	1,8E+02	1,6E+02	1,5E+02
Épuisement ressources abiotiques (kg d'antimoine eq.)	2,8E+00	2,7E+00	2,2E+00	2,2E+00
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	2,1E-01	2,0E-01	1,7E-01	1,6E-01
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	6,9E-02	6,5E-02	5,6E-02	5,5E-02
Dommages à la biodiversité (PDF,m²,an)	1,0E+01	9,5E+00	9,9E+00	9,4E+00
Déchets radioactifs (dm³)	1,2E-02	1,1E-02	1,6E-02	1,4E-02
Dommages à la santé (DALY)	2,8E-04	2,6E-04	2,3E-04	2,3E-04
Odeur (Mm³ d'air)	1,8E+01	1,8E+01	1,8E+01	1,8E+01
	BBC+PV - A1	BBC+PV - A2	BBC+PV - B1	BBC+PV - B2
Effet de serre (100 ans) (kgCO2 eq.)	2,0E+02	2,0E+02	1,8E+02	1,9E+02
Acidification (kg SO2 eq.)	4,4E-01	3,6E-01	3,9E-01	3,7E-01
Demande cumulative d'énergie (GJ)	2,7E+00	2,6E+00	2,7E+00	2,6E+00
Eau utilisée (m³)	4,5E-01	4,1E-01	4,8E-01	4,1E-01
Déchets produits (t)	1,3E+02	1,2E+02	1,2E+02	1,2E+02
Épuisement ressources abiotiques (kg d'antimoine eq.)	1,3E+00	1,3E+00	1,3E+00	1,3E+00
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	1,4E-01	1,3E-01	1,3E-01	1,3E-01
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	2,9E-02	2,7E-02	2,8E-02	2,7E-02
Dommages à la biodiversité (PDF,m²,an)	9,0E+00	8,6E+00	9,0E+00	8,6E+00
Déchets radioactifs (dm³)	1,5E-03	1,0E-03	2,1E-03	1,0E-03
Dommages à la santé (DALY)	1,4E-04	1,3E-04	1,4E-04	1,3E-04
Odeur (Mm³ d'air)	1,8E+01	1,8E+01	1,8E+01	1,8E+01
	PAS+PV - A1	PAS+PV - A2	PAS+PV - B1	PAS+PV - B2
Effet de serre (100 ans) (kgCO2 eq.)	1,8E+02	1,7E+02	1,5E+02	1,5E+02
Acidification (kg SO2 eq.)	4,6E-01	3,9E-01	4,1E-01	3,9E-01
Demande cumulative d'énergie (GJ)	2,2E+00	2,1E+00	2,2E+00	2,1E+00
Eau utilisée (m³)	4,9E-01	4,6E-01	5,2E-01	4,6E-01
Déchets produits (t)	1,3E+02	1,3E+02	1,3E+02	1,3E+02
Épuisement ressources abiotiques (kg d'antimoine eq.)	1,1E+00	1,0E+00	1,0E+00	1,0E+00
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	1,4E-01	1,3E-01	1,3E-01	1,3E-01
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	3,1E-02	2,8E-02	2,9E-02	2,8E-02
Dommages à la biodiversité (PDF,m²,an)	9,2E+00	8,9E+00	9,2E+00	8,9E+00
Déchets radioactifs (dm³)	1,7E-03	1,2E-03	2,4E-03	1,4E-03
Dommages à la santé (DALY)	1,4E-04	1,3E-04	1,3E-04	1,3E-04
Odeur (Mm³ d'air)	1,7E+01	1,7E+01	1,7E+01	1,7E+01

Tableau 77 : Résultats ACVA prospective (matériaux+énergie), par usager, par an en fonction des scénarios prospectifs

	BBC - A1	BBC - A2	BBC - B1	BBC - B2
Effet de serre (100 ans) (kgCO2 eq.)	2,1E+02	2,1E+02	1,9E+02	2,0E+02
Acidification (kg SO2 eq.)	5,4E-01	5,3E-01	4,6E-01	4,5E-01
Demande cumulative d'énergie (GJ)	4,6E+03	4,5E+03	4,4E+03	4,4E+03
Eau utilisée (m³)	1,5E+03	1,4E+03	1,7E+03	1,6E+03
Déchets produits (t)	2,5E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02
Épuisement ressources abiotiques (kg d'antimoine eq.)	1,5E+00	1,5E+00	1,4E+00	1,4E+00
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	1,2E-01	1,1E-01	1,1E-01	1,1E-01
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	3,6E-02	3,5E-02	3,2E-02	3,2E-02
Dommages à la biodiversité (PDF,m²,an)	1,0E+01	1,0E+01	1,0E+01	1,0E+01
Déchets radioactifs (dm³)	1,9E-02	1,7E-02	1,9E-02	1,8E-02
Dommages à la santé (DALY)	1,7E-04	1,7E-04	1,6E-04	1,6E-04
Odeur (Mm³ d'air)	3,2E+00	3,3E+00	3,1E+00	3,3E+00
	BBC+PV - A1	BBC+PV - A2	BBC+PV - B1	BBC+PV - B2
Effet de serre (100 ans) (kgCO2 eq.)	2,1E+02	2,1E+02	2,0E+02	2,0E+02
Acidification (kg SO2 eq.)	5,3E-01	5,3E-01	4,7E-01	4,7E-01
Demande cumulative d'énergie (GJ)	3,7E+03	3,7E+03	3,7E+03	3,6E+03
Eau utilisée (m³)	1,1E+03	1,1E+03	1,2E+03	1,2E+03
Déchets produits (t)	2,5E+02	2,5E+02	2,4E+02	2,4E+02
Épuisement ressources abiotiques (kg d'antimoine eq.)	1,4E+00	1,5E+00	1,3E+00	1,4E+00
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	1,5E-01	1,5E-01	1,5E-01	1,5E-01
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	3,6E-02	3,6E-02	3,4E-02	3,4E-02
Dommages à la biodiversité (PDF,m²,an)	1,2E+01	1,2E+01	1,2E+01	1,2E+01
Déchets radioactifs (dm³)	1,0E-02	9,2E-03	1,0E-02	9,6E-03
Dommages à la santé (DALY)	1,8E-04	1,8E-04	1,8E-04	1,7E-04
Odeur (Mm³ d'air)	3,3E+00	3,4E+00	3,3E+00	3,4E+00
	PAS+PV - A1	PAS+PV - A2	PAS+PV - B1	PAS+PV - B2
Effet de serre (100 ans) (kgCO2 eq.)	1,7E+02	1,7E+02	1,6E+02	1,6E+02
Acidification (kg SO2 eq.)	5,1E-01	5,0E-01	4,5E-01	4,5E-01
Demande cumulative d'énergie (GJ)	3,2E+03	3,1E+03	3,1E+03	3,0E+03
Eau utilisée (m³)	1,1E+03	1,1E+03	1,3E+03	1,2E+03
Déchets produits (t)	2,5E+02	2,5E+02	2,5E+02	2,5E+02
Épuisement ressources abiotiques (kg d'antimoine eq.)	1,1E+00	1,2E+00	1,0E+00	1,1E+00
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	1,5E-01	1,5E-01	1,4E-01	1,4E-01
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	3,6E-02	3,6E-02	3,3E-02	3,3E-02
Dommages à la biodiversité (PDF,m²,an)	1,3E+01	1,2E+01	1,3E+01	1,2E+01
Déchets radioactifs (dm³)	1,0E-02	9,5E-03	1,1E-02	9,8E-03
Dommages à la santé (DALY)	1,7E-04	1,7E-04	1,6E-04	1,6E-04
Odeur (Mm³ d'air)	2,4E+00	2,4E+00	2,4E+00	2,4E+00

Annexe U. Meeting Report: international seminar on Relevant Environmental indicators for LCA Applications in Urban Projects

15 December 2015, MINES ParisTech

The aim of the seminar is to improve LCA application in the field of urban design, by studying a set of appropriate indicators.

"End-point" indicators correspond to priority issues for decision makers (health, biodiversity, and resources) but their evaluation is more difficult and uncertain than "mid-point". Recommendations are provided e.g. by ILCD but research is still ongoing.

The seminar aims to share the state of the art in this field and to exchange about a relevant indicators system, based upon the present knowledge, to apply LCA in urban projects.

Participants : Cécile Bulle (Univ. of Quebec), Jeroen Guinée (Univ. of Leiden), Rolf Frischknecht (TREEZE and ETHZ), Fabien Leurent (ENPC), Jean Roger Estrade (Agro), Maxime Trocmé and Christophe Gobin (VINCI), Bruno Peuportier (ENSMP) and by phone 11 January Göran Finnveden (KTH).

A. CHAIR PRESENTATION BY BP.

Bruno Peuportier makes an introduction on the objective of the chair on Ecodesign of Buildings and Infrastructure.

Three schools are working together in this research chair. There are different indicators and methodologies used in the three labs. One objective is to progress towards a convergence between the various approach, among them LCA.

The first set of LCA indicators was chosen in the LCA tool twenty years ago and was updated ten years ago. It is now time to improve it considering research progress in the field. However, the model that will be chosen cannot be changed every year as the users need stability.

The current set of indicators in the building LCA tool novaEQUER is the following:

- Two Endpoint indicators
 - o Human Health (EI99)
 - o Biodiversity (EI99)
 - o Depletion of Abiotic Resources (CML)
- Midpoint indicators

- Global warming potential (GWP100, IPCC)
- Acidification potential (CML)
- Eutrophication potential (CML)
- Photochemical ozone formation potential (CML)
- Malodorous air (CML)
- Additional indicators
 - Primary Energy demand (CED)
 - Water consumption
 - Radioactive waste
 - Waste generation
- Additional indicators only at the district level :
 - Land occupation (Bentrup et al., 2002)
 - Land transformation (Bentrup et al., 2002)

In the transport sector, the direct energy consumption, direct CO₂, CO, PM10, NO_x emissions are evaluated.

In the local biodiversity assessment tool, two main indicators are used: the Shannon-Wiener index and the saturation index.

Main questions addressed by the seminar are:

- How should the indicator set evolve?
- Could local transport and biodiversity assessment be combined with LCA?
- What are the good practices to choose and merge indicators, what recommendation have to be followed?

B. CHOOSING INDICATORS: GENERALITY

The choice of indicators depends on LCA objectives and audience. The difficulty for eco-design tools is that they have to be simple enough to be used by non-LCA expert but have to cover a wide range of objectives (e.g. design of new buildings, refurbishment, ...) and project type (e.g. from single house to whole neighborhood, various locations and contexts).

The research needs have to be distinguished from the "operational" needs.

The Product Environmental Footprint is mentioned a few times by R.F and J.G because there exist a related forum that tries to build up consensus around sets of indicators.

But for the ILCD, and PEF, there are other ongoing forums on harmonization of LCA, for instance the LC initiative. <http://www.lifecycleinitiative.org/>

The best would be to use recommended indicators by ILCD or PEF because there is a convergence of knowledge at the European Union scale. Now, everybody uses the IPCC method for the GWP because it is an international reference.

It is important to be able to calculate a wide range of indicators starting from the inventory. This allows doing contribution analysis and helps to select meaningful indicators.

In ImpactWorld+, there is a differentiation between long and short term impacts for endpoint. A period of 100 years after the emission is considered for short term, and the remaining 100-500 years is considered for long-term.

Normalization is sometimes used to help prioritizing indicators. However, some normalization values are built on poor data sets and may not be representative of the impact. From the point of view of C.B, it is a better approach to visualize impacts contributions to the damage (endpoint indicator) to help selecting indicators.

- Apply normalization with caution
- In a research perspective, calculate a wide range of indicators
- LCA has to be used as a comparative tool.
- Follow PEF or ILCD guidelines for operational uses, however, lots of things have evolved since the ILCD release (land use and water mainly).
- Calculate a large number of indicators for research uses, even if (B.P) we need to have a restricted set of indicators for professional users.
- Differentiate long term and short term emission and report them separately

Endpoint vs Midpoint

It is important to avoid double counting in the indicator set. For instance one should not evaluate human health impact including global warming while evaluating global warming as a midpoint indicator (J.G.).

If we do so, the link between mid and endpoint has to be clearly stated and visible.

It is important to evaluate mid and endpoint in a separate way, then put the results in perspective which help prioritizing indicators. It is a better technique than the prioritization by normalization says C.B, as normalization values could be misleading.

If we evaluate endpoint indicators, we can later go back to the midpoint, knowing which are the most important ones (the most influential).

Endpoint indicators have to be shown on a log scale, in order to understand the magnitude of impacts but not to give too much importance to small differences between two alternatives.

C. TOXICITY INDICATORS (HUMAN AND ECOSYSTEM)

The USEtox model is recommended by ILCD and seems to be the model which is going to evolve the most in the future. It is built around an institutional consensus.

One drawback of the model is a lack of precision regarding metal long term emissions. This has to be carefully addressed. This should be corrected in the short-term evolution.

- ➔ Consensus around USEtox
- ➔ USEtox model seems to be the most stable one, the one that will be developed in the future
- ➔ Maybe switch to another indicator if metal are the most contributing elements??

Information available: European project OMNIITOX (<http://infoscience.epfl.ch/record/168703>): Operational Models and Information tools for industrial application of eco/TOXicological impact assessments.

J.G.: USEtox represents an institutional consensus but not a scientific consensus. It is evaluated from only 60 flows whereas more than 2 or 3000 flows could be referenced. However it is not a model but a data issue.

J.G.: The USEtox model is almost an endpoint method because it goes very far in the causality chain.

D. RESOURCES INDICATORS: MINERALS, FOSSIL FUELS, WATER, BIOTIC RESOURCES

J.G: The first question when we look at resource issue is: what do we want to evaluate. If we look at the existing methods, some have an economic approach, other look at the availability of resource for future generation. Every choice is subjective: what reserve type to use, mixing fossil fuel and minerals or not (J.G say they should be split), how to account for uranium...

The antimony equivalent was chosen for resource depletion in the CML methodology because it was the mineral that was referenced the best. Enough data was available.

J.G: Fossil fuel and mineral issue are very different because the use of fossil fuel is almost always dispersive (burnt) whereas use of mineral could be dispersive or not (paint vs recyclable material). The CML methodology is always recommended, there is a consensus on it (G.F.), but it has changed to take into account this difference and it would not be relevant to re-aggregate mineral and fossil resources in the indicator set.

The important impact on resource is related to what we have lost and cannot use anymore.

Water scarcity is not a global scale problem but a local one. There is an ISO group working on water depletion indicators: WALCA. Provide indicator compliant with ISO standard. The impact assessment method should be available

by the end of January 2016. On the other hand, C.B. suggests using water footprint instead of counting every water flux separately.

The Collective Energy Resource Depletion (in kWh or MJ), or primary energy accounting used in NovaEQUER is also a resource indicators, taking energy as a resource. Energy resources accounted for are resources which have a limited availability. For instance, hydraulic power comes from the electricity network, which is limited in power: if someone consumes hydroelectricity, others cannot do so. Geothermal energy should also be accounted for as it could be limited. On the other hand, if someone installs photovoltaic panels on his roof, everyone can also do it, the resource is not affected.

JG/R.F: This indicator should be clearly defined, the name of the indicator is not transparent enough to understand what is really evaluated thanks to it.

E. OTHER INDICATORS

Three methods are recommended for eutrophication (marine, terrestrial, freshwater). This topic having in most cases a very little influence in building LCA, it does not seem relevant to replace the current indicator by three ones. C.B. proposes to use the ImpactWorld+ method because it is extendable at the endpoint level for marine and freshwater eutrophication. G.F. proposes to continue to use the CML method. G.F proposes to continue to use the CML method.

At the moment, land use indicator is not used at the building level (only at the districts one) because of the very strong impact occurring when using wood as a building material. For the land transformation, a time period is normally required. But no time period appears in LCI, it is a reason why this indicator is no more used yet. For the land use, the best is to use the indicator from LC initiative because it is the recommended indicator at the European scale.

F. METHODOLOGICAL DIVERGENCE

Dynamic assessment of carbon emissions:

There is an issue regarding the time boundaries considered in our project. C.B. thinks that time boundaries are not consistent when using GWP100, especially for long-lasting systems such as buildings. The timing of emission should be taken into account.

R.F does not agree on dynamic LCA for GWP because evaluation of the global warming indicator is based on relative radiative forcing, so the timing of emission is not important.

J.G. says the best would be to have an infinite time horizon but the GWP 500 is already very uncertain (withdrawn from IPCC 2013).

Publication on the subject:

- Levasseur Annie
- Cherubini Francesco
- Kendal Alissa

One way to solve this issue, says R.F, could be to have a distance to target approach. For instance if we have a specific emission budget not to overpass over a certain period of time.

Precautionary principle:

C.B. says: be careful with the precaution principle in LCA. Potential is different from precaution. Potential says we cannot evaluate precisely the consequences.

Distance to target indicators :

R.F.: It could be very interesting to work with « distance to target » indicators, which is at the basis of the ecological scarcity method used in Switzerland.

Impact regionalization

There is no consensus on the importance of regionalized LCA or not. C.B thinks that after a first iteration of impact assessment, if some indicators that could have an important regional variation (e.g. water but not GWP) have important contribution, then the analyst should work on regionalizing the most contributing flows in the inventory.

On the other hand, it could be very data intensive and the data quality might be very heterogeneous from one part of the life cycle to the other. We could end up with a lot of detail for a small part of the life cycle but very rough data for the rest. Furthermore, going at the local scale would increase the results uncertainty (J.G.).

R.F.: The working group on inorganic inventory emissions is working on the effect of indoor emissions which are local emissions but could be also very influential for the human health.

Temporal variation of impacts

B.P.: Regarding the electricity production, there are strong annual variations. A dynamic LCA is required. Also the decomposition of COVs linked with photochemical ozone formation varies with the period of the year.

C. B.: Some characterization factors including temporal variation already exist.

G. LCA IN BIODIVERSITY AND TRANSPORT MODELING

R.F: We can see a clear link between transport modeling and LCA study as new information from the transport could be integrated in the LCI.

J.G.: It is different for biodiversity studies that seems to have a completely different scope compared to LCA. Different tools, different metrics and different objectives.

C.B: An integrated study (biodiversity/LCA) still is very important.

The issue is to understand the relative magnitude of local biodiversity vs global biodiversity impacts. (e.g. : "is it better to install PV panel or to have vegetation and fruits production on the roofs?") There is no consensus on this question.

JG: impact assessment and LCA are complementary but might not be mixable.

H. OTHERS IMPORTANT TOPICS IN LCA

Uncertainty in LCA

There is a consensus on the very high importance of this subject for LCA.

Uncertainty could be related to problem definition and choice of data.

JG.: We have to acknowledge that we always miss a lot of things. We may forgot things, or take them into account in a wrong way because of our lack of knowledge on them. This is especially true for toxicity impacts or for substances having a long term effect. Also the quality of available data can be poor.

We should perform relative uncertainty analysis: LCA is a comparative tool. If we did an absolute uncertainty analysis, it would be very high. For instance comparing 2 systems, we should take out the uncertainties that are the same for both systems. So be careful when using Monte Carlo methods, we must not break the dependence between the alternatives (calculations must not be done separately). (J.G. mentioned the work of Patrik Henriksson for the comparison of different alternatives: Henriksson et al. 2014 – Product carbon footprints and their uncertainties in comparative decision contexts).

C.B. says that a PhD is going to be defended next week in CIRAIG on that topic (Stéphanie Muller).

Even if we have many midpoint indicators, in comparative LCA, many of them are close when comparing e.g. design alternatives. Taking into account uncertainties, we could focus on the indicators that are really different to make a decision. However, C.B. says that you might make a decision based on impacts

that have negligible effects. J.G. says that small contributions make the total impact.

Prospective in LCA

J.G. indicates that prospective topics also are important. It is another way to do LCA to explore the future and to look at the possible changes occurring.

I. EVOLUTION OF THE INDICATOR SYSTEM

In this section, we suggest a new indicator system to be implemented in our ecodesign tool.

First, following the above discussions we suggest to keep both Endpoint and midpoint indicators but we acknowledge that it is important to clearly separate them and link midpoint to their related endpoint indicators to avoid double counting and misinterpretation of the indicators results.

On the short term, only indicators accessible in the ecoinvent database are considered. ImpactWorld+ methodology looks promising; however it is not yet available in ecoinvent. The following midpoint indicators are thus candidates for the new indicator set, by area of protections:

MidPoint	EndPoint
Collective Energy Resource Depletion (unchanged), integrating all energy type but energy from a renewable source if produced and consumed on the building site itself	RESSOURCES
Abiotic depletion of mineral (in Sbeq, CML methodology, mineral and fossil non differentiated in ecoinvent v3 it but could be easily fixed by post-processing)	
Water consumption (unchanged, then ImpactWorld+ or WALCA method when available).	
Waste generation (unchanged)	
Respiratory effects: Particulate matter formation (ReCiPe2008/ImpactWorld+), Photochemical ozone formation (ReCiPe2008/ImpactWorld+), Ionizing radiation, Radioactive waste generation (unchanged)	HUMAN HEALTH
Human toxicity : cancerigen and non cancerigens aggregated (USEtox)	
Climate change GWP100 : IPCC2013 only if ecoinvent v3.2 , IPCC2007 otherwise ¹³⁰ . ReCiPe or ImpactWorld+ methodology for the potential Endpoint evaluation on human health and biodiversity.	
Eutrophication potential , (unchanged) CML methodology: Eutrophication impacts are usually not important in the building sector. We would like to keep a single indicator for this issue	BIODEVERSITY
Acidification potential , ReCiPe methodology (could be replaced by Accumulated Exceedance or ImpactWorld+ when available in ecoinvent)	
Ecotoxicity , USEtox	
Land Use , ReCiPe in a first step (could be replaced when others promising land use methods will be available in ecoinvent, such as ImpactWorld+)	

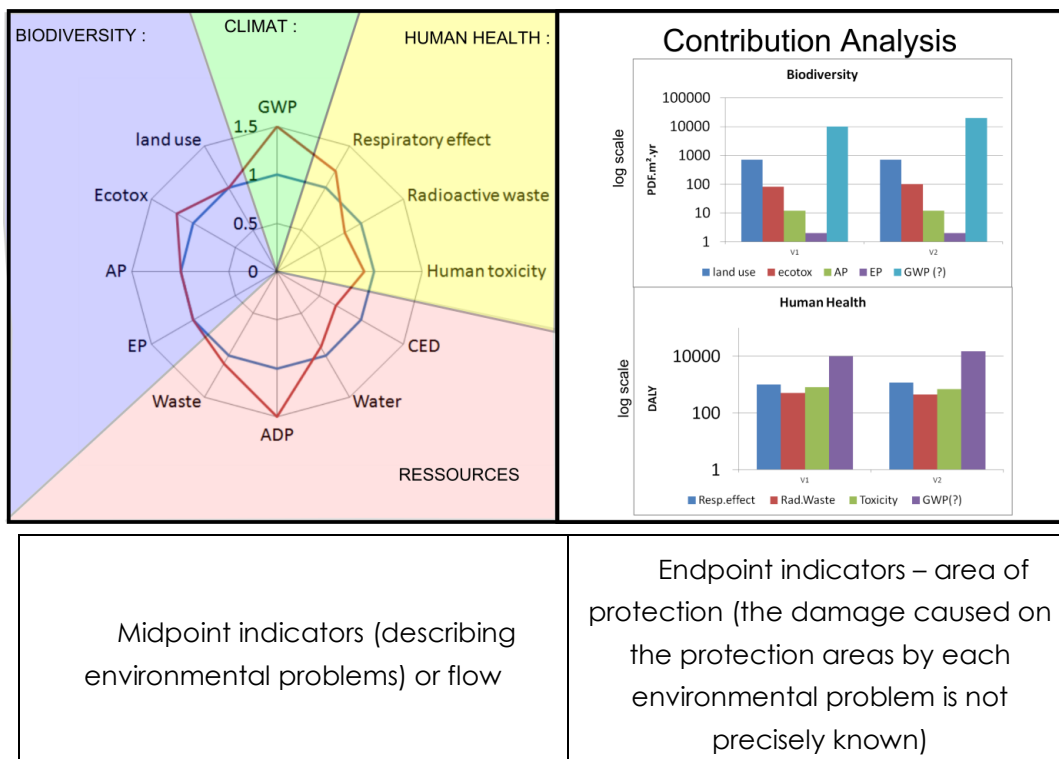
Further suggestions:

Photochemical ozone and particulate matter have robust endpoint model and could be expressed in DALYs and potentially merged into “respiratory effects”.

¹³⁰ Use of IPCC2013 in ecoinvent v3.1 was not recommended by ecoinvent due to errors in the characterisation factors : http://www.ecoinvent.org/files/report_of_changes_v3_2.pdf, p16

Climate change might be separated from the area of protection or included in endpoint unit. However, due to very large uncertainties of the endpoint model, there should be a warning for the user. An option could be set to include or exclude GWP to endpoint contribution.

Impact visualization proposition:



Elements:

- prioritisation of indicators using endpoint contribution for biodiversity and human health and potentially using normalization factors for resources. French normalization factors could be evaluated for waste generation, cumulative energy demand and water use. However factors for abiotic depletion are only available at the European level (CML 2015).
- Log scale to express endpoint results

J. COLLABORATION POSSIBILITIES

J.G. proposes to B.P. to join the SETAC community.

C.B. proposes that some member of the Chair attend the SETAC meeting, not as participant but as listeners.

Résumé

L'analyse de cycle de vie (ACV) permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un bâtiment/quartier sur l'intégralité du cycle de vie : fabrication des matériaux, construction, utilisation, rénovation, démolition et traitement des déchets. L'objectif général de la thèse est d'améliorer la qualité de l'aide à la décision fournie par les outils d'éco-conception basés sur l'ACV.

Trois axes de travail en interaction ont été explorés :

- **Conséquentiel** : Les décisions prises lors de la conception d'un bâtiment ou d'un quartier vont avoir des conséquences au-delà du secteur du bâtiment, par exemple sur le secteur énergétique. Quelles conséquences peut-on évaluer, et comment ?
- **Dynamique** : La consommation et la production d'énergie, et en particulier d'électricité est très variable dans le temps (hiver/été, jour/nuit). Comment tenir compte de ces variations ?
- **Prospectif** : Comment intégrer des changements futurs (mix énergétiques, changements climatiques) sur la longue durée de vie des ensembles bâtis ?

Mots Clés

Bâtiments, quartiers, impacts environnementaux, analyse de cycle de vie conséquentielle

Abstract

Life-Cycle-Analysis allows evaluating environmental impacts of buildings and districts throughout their entire life-cycle: buildings materials production, building site, operation, retrofitting, demolition, waste management. The objective of this thesis is to improve relevance and accuracy of the decision aid provided by LCA-based design tools.

Three interacting topics have been investigated:

- **Consequential assessment**: Decisions taken during the design process lead to consequences out of the building sector, for instance on the energy system. What consequences of a design project should and can be evaluated, and how?
- **Dynamic**: Energy consumption and production (especially electricity) are highly variable (winter/summer, day/night). How to account for these variations?
- **Prospective**: How to take into account future changes (energy mix, climate change) over the long life span of buildings and districts?

Keywords

Buildings, districts, environmental impact assessment, consequential life cycle analysis