

Analyse du cycle de vie à l'échelle du quartier

Auteur : Sevin, Matthieu

Promoteur(s) : Reiter, Sigrid

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/4676>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Faculté des Sciences Appliquées

Analyse du cycle de vie à l'échelle du quartier



Mémoire de fin d'étude réalisé en vue de l'obtention du grade de
Master Ingénieur Civil Architecte par Matthieu Sevin

Année académique 2017 – 2018

Promotrice : Sigrid REITER

Composition du jury : Pierre LECLERCQ, Anne-Françoise MARIQUE,
Iris REUTER, Jacques TELLER

Avant toutes choses, je souhaite chaleureusement remercier Madame Sigrid Reiter, promotrice de ce mémoire, pour m'avoir suivi tout au long de l'année, pour son intérêt vis-à-vis de mon travail, pour sa motivation et pour ses conseils avisés.

Je souhaite également remercier les membres du jury, Madame Anne-Françoise Marique, Madame Iris Reuter et Monsieur Jacques Teller pour le temps et l'intérêt qu'ils m'ont consacré.

Enfin, je remercie également Madame Florence Grégoire, ingénieure projet chez Ecorce et Monsieur Damien Franzen, architecte, pour avoir accepté de me rencontrer, de me fournir certaines données précieuses et de me prodiguer leurs conseils.

Résumé

Plus de 50% de la population mondiale vit en ville (Nations Unies, 2013) et le secteur du bâtiment est un des secteurs les plus consommateurs en ressources naturelles et notamment en énergies fossiles. Il induit d'énormes impacts environnementaux. Dans les pays industrialisés, le secteur de la construction est responsable de 42% de la consommation d'énergie finale (IEA, 2011), de 35% des émissions de gaz à effet de serre (B. Metz et al., 2007) et de 50% des extractions tous matériaux confondus (Commission européenne, 2011).

Le fort impact environnemental du secteur du bâtiment a bien été compris par les autorités européennes. De nouvelles réglementations entrent régulièrement en vigueur visant à réduire les consommations énergétiques des bâtiments neufs. Ces réglementations sont de plus en plus exigeantes. Cependant, elles ne visent qu'une seule échelle, celle du bâtiment, ne concernent qu'un seul indicateur, la consommation d'énergie et qu'une seule étape du cycle de vie, l'étape d'occupation.

Dans ce mémoire de fin d'étude, nous avons souhaité élargir la réflexion. Alors que les normes énergétiques réduisent efficacement les impacts environnementaux liés aux consommations énergétiques, il est maintenant nécessaire de pousser la démarche plus loin. Ainsi, nous ne travaillerons plus à l'échelle d'un seul bâtiment mais à l'échelle urbaine. Nous n'étudierons plus un seul indicateur mais plus de dix. Nous ne nous focaliserons plus sur une seule étape mais nous étudierons tout le cycle de vie.

Le but de cette approche est de déterminer, à l'échelle du quartier, les sources d'impacts environnementaux les plus importantes. Par l'étude de multiples scénarios, nous déterminerons l'influence sur les résultats de l'analyse du cycle de vie du quartier de plusieurs paramètres. Nous chercherons ainsi à quantifier l'impact de l'orientation, de la gestion des eaux pluviales, de la densité, de la mobilité ou encore de l'utilisation d'énergies renouvelables sur le bilan environnemental d'un quartier.

Ainsi, il nous sera possible de dégager certains paramètres de conception qui sont à traiter en priorité, dans un but de durabilité.

Tables des matières

Chapitre 1:	Introduction.....	1
1.1.	La prise de conscience environnementale.....	1
1.2.	L'importance du secteur du bâtiment.....	2
1.3.	Aspects Règlementaires	3
1.4.	Objectifs du présent travail	4
1.5.	Choix de l'analyse du cycle de vie	5
1.6.	Structure du mémoire	6
Chapitre 2:	L'Analyse du Cycle de vie – Etat de l'art.....	7
2.1.	Définition	7
2.2.	Historique.....	7
2.3.	Méthode générale	9
2.3.1.	Objectif et champ d'application	10
2.3.2.	Inventaire du cycle de vie (LCI)	11
2.3.3.	Evaluation de l'impact (LCIA)	12
2.3.4.	Interprétation	15
2.3.5.	Limites de la méthode.....	15
2.4.	L'analyse du cycle de vie appliquée au bâtiment	18
2.4.1.	Méthode	19
2.4.2.	Limites de la méthode.....	33
2.4.3.	Principaux résultats issus de l'état de l'art.....	35
2.5.	Analyse du cycle de vie à l'échelle du quartier	38
2.5.1.	Méthode	39
2.5.2.	Limites de la méthode.....	44
2.5.3.	Principaux résultats issus de l'état de l'art.....	45

Chapitre 3:	Choix méthodologiques.....	48
3.1.	Choix du quartier d'étude.....	48
3.1.1.	Site	48
3.1.2.	Programme.....	50
3.1.3.	Conception durable	50
3.2.	Hypothèses concernant l'ACV	50
3.2.1.	Objectifs et champ d'application	50
3.2.2.	Choix des données.....	51
3.2.3.	Indicateurs environnementaux	52
3.3.	Choix de l'outil d'analyse	52
3.4.	Choix des scénarios étudiés.....	54
Chapitre 4:	Modélisation du quartier et analyse thermique dynamique	55
4.1.	Caractéristiques du projet.....	55
4.1.1.	Données générales de construction.....	55
4.2.	Modélisation 3D.....	58
4.3.	Zonage Thermique	59
4.3.1.	Températures de consigne de chauffage.....	60
4.3.2.	Puissances dissipées (W/m^2).....	61
4.3.3.	Pourcentage d'occupation	61
4.3.4.	Ventilation	63
4.3.5.	Chauffage	63
4.4.	Résultats de la simulation thermique dynamique.....	63
Chapitre 5:	Analyse du cycle de vie – Scénario initial	65
5.1.	Données générales relatives au projet.....	65
5.1.1.	A l'échelle du bâtiment	65
5.1.2.	Données à l'échelle du quartier	68
Chapitre 6:	Impact de l'orientation.....	75
6.1.	Scénarios	75
6.2.	Résultats	75
Chapitre 7:	Impact de la gestion des eaux	78
7.1.	Scénarios	78

7.1.1.	Systèmes de récupération des eaux pluviales	79
7.1.2.	Sols perméables	79
7.2.	Résultats	80
7.2.1.	Impact des systèmes de récupération des eaux de pluie	80
7.2.2.	Impact de la perméabilité des sols	81
7.2.3.	Comparaison des trois scénarios.....	82
Chapitre 8:	Impact de la mobilité	83
8.1.	Scénarios	83
8.2.	Résultats	84
Chapitre 9:	Impact de la densité	86
9.1.	Scénarios	86
9.1.1.	Densité Verticale	86
9.1.2.	Densité horizontale.....	87
9.2.	Résultats	87
9.2.1.	Résultats du scénario « densité verticale »	87
9.2.1.	Résultats du scénario « densité horizontale »	90
9.2.2.	Comparaison des trois scénarios.....	91
Chapitre 10:	Impact de l'utilisation d'énergies renouvelables	92
10.1.	Scénarios	92
10.2.	Résultats	92
Chapitre 11:	Comparaison des différents scénarios	95
Conclusion		98
Bibliographie.....		99
Table des Figures		106
Liste des Tableaux.....		108
Annexes :		110

Chapitre 1: Introduction

1.1. La prise de conscience environnementale

Depuis les années 70, une prise de conscience généralisée émerge à l'égard des problèmes environnementaux. Le premier choc pétrolier, la fin des Trente Glorieuses et l'apparition d'un chômage de masse sont des faits marquants qui viennent remettre en question l'aspect idéaliste du modèle de société en vigueur depuis la fin de la seconde guerre mondiale dans les pays occidentaux. Les populations commencent à remarquer l'incompatibilité entre la bien portance du système productiviste qui réside en une croissance infinie et la survie de l'écosystème tel qu'on le connaît alors. Ainsi, de nombreuses personnes en viennent à penser qu'il serait bénéfique pour tous de modifier le modèle de fonctionnement de notre société (Simonen, 2014).

En 1970, deux grandes organisations non gouvernementales sont créées dans le but de lutter pour la protection de la nature : Greenpeace et le World Wild Fund (WWF). L'année suivante, le Club de Rome publie son rapport sous la tutelle du mondialement respecté Massachusetts Institute of Technology. Celui-ci prévient que le développement frénétique des grandes nations industrialisées conduirait à l'épuisement des réserves mondiales de ressources non renouvelables. Les Nations Unies développent alors un programme visant à coordonner les actions de protection de l'environnement à l'échelle mondiale (Libération, 2009).

Les nombreuses catastrophes environnementales de plus en plus médiatisées jouent un rôle important dans cette prise de conscience. Les marées noires, Tchernobyl, l'ouragan Katrina, ou la canicule de 2003 qui provoque la mort de 15000 personnes en France marquent les esprits.

Au début du XXIème siècle, un bond est fait dans la prise de conscience internationale des problèmes environnementaux. Les communiqués du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) des Nations Unies y sont pour beaucoup. Ils affirment que l'homme est responsable à 90% de l'aggravation de l'effet de serre et que celui-ci pourrait mener à une montée du niveau des eaux de plus de 40 cm. Ils pointent les risques économiques, environnementaux et sociaux que le réchauffement climatique pourrait engendrer (Commission européenne, 2011). Même l'Eglise catholique réagit en définissant un nouveau péché, le péché de pollution.

Des objectifs sont fixés à l'échelle européenne afin de répondre aux problématiques environnementales. Le « paquet 2020 », ensemble d'actes législatifs contraignants, vise une réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre (vis-à-vis des émissions de 1990), une réduction de 20% de la consommation d'énergie primaire et un recours aux énergies renouvelables de l'ordre de 20% de la consommation globale européenne. Ces objectifs, définis en 2007, sont à atteindre pour 2020 dans le cadre d'une croissance intelligente et durable (Commission européenne, 2007).

Certains résistent cependant à cette prise de conscience générale, doutant même de l'existence de dérèglements climatiques. Ces climato-sceptiques préfèrent fermer les yeux plutôt que de réfléchir à de nouvelles méthodes de production plus respectueuses de l'environnement. A leur tête, le président actuel des Etats-Unis d'Amérique qui n'as pas hésité à sortir la plus grande puissance mondiale des accords de Paris sur le climat.

Pour arriver aux objectifs d'efficacité énergétique visés par la commission européenne, tous les secteurs consommateurs d'énergie doivent évoluer et prendre des mesures ambitieuses. Le secteur du transport est responsable de 31% des consommations finales globales d'énergie, le secteur de l'industrie de 27%. Cependant, le premier grand consommateur est le secteur du bâtiment (Commission européenne, 2007).

1.2. L'importance du secteur du bâtiment

Plus de 50% de la population mondiale vit en ville (Nations Unies, 2013) et le secteur du bâtiment est un des secteurs les plus consommateurs en ressources naturelles et notamment en énergies fossiles. Il induit d'énormes impacts environnementaux. Dans les pays industrialisés, le secteur de la construction est responsable de 42% de la consommation d'énergie finale (IEA, 2011), de 35% des émissions de gaz à effet de serre (B. Metz et al., 2007) et de 50% des extractions tous matériaux confondus (Commission européenne, 2011). De plus, l'étalement urbain provoque une occupation du sol toujours plus importante. Entre 1980 et 2000, l'espace bâti européen a vu sa surface augmenter de 20% (European Environment Agency, 2006). Les bâtiments sont responsables de différents types de consommation de sols : une consommation que l'on appelle primaire, c'est-à-dire leur empreinte physique au sol, mais aussi une consommation secondaire, du fait de l'extraction, de la production, du transport et des traitements de fin de vie des produits de construction (K. Allacker et al., 2014). Ce type d'impact est très peu, voire pas considéré dans la plupart des études, notamment les études d'analyse du cycle de vie de l'environnement bâti (D. Trigaux et al., 2017).

Cependant, les chercheurs, les politiques et les entreprises travaillent depuis quelques dizaines d'années à réduire fortement l'impact environnemental des constructions. Le premier objectif affiché est de réduire les consommations énergétiques (Buyle et al., 2013). Pour cela, des outils réglementaires sont mis en place.

1.3. Aspects Règlementaires

Le fort impact environnemental du secteur du bâtiment a bien été compris par les autorités européennes. C'est également depuis les années 70, suite au premier choc pétrolier, qu'entrent régulièrement en vigueur de nouvelles réglementations visant à réduire les consommations énergétiques des bâtiments neufs. Ces réglementations sont de plus en plus exigeantes.

En Belgique, la réglementation sur la performance énergétique des bâtiments (PEB) fixe les exigences énergétiques à atteindre obligatoirement. Retraçons-en un bref historique grâce à la consultation des divers arrêtés du Gouvernement wallon correspondant aux dates suivantes :

- 1985 : La première réglementation thermique voit le jour en Wallonie. Elle fixe un niveau d'isolation thermique globale, le K70 et concerne uniquement les logements.
- 1996 : la Région wallonne fixe sa deuxième réglementation thermique, elle impose un K55 et une ventilation pour les logements, bureaux et écoles.
- 2002 : La directive PEB à proprement parlé voit le jour suite à la directive européenne « Energy Performance of Building Directive » (EPBD) (Parlement européen, 2002).
- 2006-2008 : Les différentes régions la traduisent en une réglementation.
- 2008 : La Région wallonne passe à un K45 et renforce ses exigences en termes d'isolation des parois (coefficient U_{max} en W/m^2K) et de ventilation.
- 2010 : Les coefficients E_w (100 kWh/m²an) et E_{spec} (170 kWh/m²an) naissent. Ils représentent respectivement le niveau de consommation d'énergie primaire et la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire. Une exigence concernant la surchauffe est aussi ajoutée.
- 2011 : Les E_w et E_{spec} sont renforcés et passent respectivement à 80 et 130.
- 2012 : Le U_{max} est renforcé et des exigences naissent concernant les nœuds constructifs.
- 2014 : Nous arrivons à un K35, le U_{max} est encore renforcé.
- 2016 : De nouvelles exigences portant sur les systèmes (rendement, calorifugeage, comptage électrique, etc.) s'appliquent.

L'aboutissement de toutes les réglementations thermiques et énergétiques est l'objectif européen « Zero Energy Building » (ZEB). Il vise à ce que tous les nouveaux bâtiments aient une consommation énergétique annuelle neutre, c'est-à-dire qu'ils produisent localement autant d'énergie qu'ils en consomment, sur la durée d'une année. Cet objectif est défini de nombreuses manières différentes, souvent peu précises suivant les états membres. Des détails sont à apporter concernant, notamment, les types d'énergies incluable dans le bilan, les méthodes de production d'énergies renouvelables, la définition spatiale du site (Marszal et al., 2011). En 2019, la PEB imposera à tous les nouveaux bâtiments publics de respecter le standard nZEB (nearly Zero Energy Building). Cette exigence est sensiblement moins restrictive que celle du ZEB mais vise à s'en rapprocher. Elle s'étendra en 2021 à tous les nouveaux bâtiments.

De nombreuses constructions de part et d'autre du globe atteignent déjà ces objectifs. L'International Energy Agency en a fait un recueil consultable en 2013. La majorité de ces constructions, répondant au critère ZEB, sont constituées d'un seul bâtiment. Cependant, il existe quelques rares exemples de quartiers zéro-énergie. Le quartier Vauban de Freiburg, en Allemagne, dépasse même le critère zéro-énergie.

Si les exemples de quartiers zéro-énergie sont rares, les « écoquartiers » ou « quartiers durables » foisonnent. Les labels ou référentiels fixent certains objectifs environnementaux et sociaux intéressants même s'ils sont moins poussés au niveau énergétique que celui du ZEB. Le « Référentiel Quartiers Durable », mis au point par l'équipe du laboratoire LEPUR (Centre de Recherche sur la Ville, le Territoire, et le Milieu Rural) de l'Université de Liège en est un exemple intéressant. Cependant, n'étant pas soutenu par une législation stricte, les termes « quartiers durables » ou « écoquartiers » peuvent être utilisés de manière abusive. Enfin, les méthodes d'évaluation de la durabilité des quartiers couvrent un vaste nombre de paramètres non seulement environnementaux mais aussi socio-économiques, ce qui ne leur permet pas de réaliser un bilan environnemental complet des quartiers évalués.

1.4. Objectifs du présent travail

Ainsi, nous mettons en avant trois faits marquants : les législations visant à réduire l'empreinte sur l'environnement du secteur de la construction ne s'intéressent qu'une seule échelle, celle du bâtiment, ne concernent d'un seul indicateur, la consommation d'énergie et qu'une seule étape du cycle de vie, l'étape d'occupation.

Dans ce mémoire de fin d'étude, nous avons souhaité élargir la réflexion. Alors que les normes énergétiques réduisent efficacement les impacts environnementaux liés aux consommations énergétiques, il est maintenant nécessaire de pousser la démarche plus loin. Ainsi, nous ne travaillerons plus à l'échelle d'un seul bâtiment mais à l'échelle urbaine. Nous n'étudierons plus un seul indicateur mais plus de dix. Nous ne nous focaliserons plus sur une seule étape mais nous étudierons tout le cycle de vie.

Dans ce travail de fin d'étude, nous souhaitons étudier différents paramètres qui impactent le bilan environnemental d'un quartier. Nous considérerons plusieurs indicateurs environnementaux que nous détaillerons par la suite. Nous souhaitons dégager les paramètres déterminants ayant l'incidence la plus importante sur la qualité environnementale d'un quartier. Il peut s'agir par exemple de l'orientation, de la présence ou non de sols perméables, de sources d'énergies renouvelables ou de l'intégration aux réseaux de transport en commun. Même si l'influence générale de certains de ces paramètres est connue, nous souhaitons en quantifier précisément les impacts environnementaux et comparer leur importance par rapport à celle des autres paramètres étudiés. Pour cela, nous effectuerons l'analyse environnementale d'un quartier et nous feront varier différents paramètres de conception afin de quantifier leurs impacts. Ainsi, nous serons capables de fournir des recommandations concernant certains choix de conception et leurs impacts environnementaux potentiels.

1.5. Choix de l'analyse du cycle de vie

Toutes les réglementations européennes évoquées précédemment ont le mérite de faire diminuer les consommations énergétiques des bâtiments durant leur phase d'occupation. Cependant, elles se concentrent uniquement sur cette phase-ci. Toutes les autres phases du cycle de vie : l'extraction des matières premières, la production, le choix des matériaux de construction, leur transport, ou bien même leur recyclage en fin de vie ne sont pas prises en compte. Ainsi, notre travail a pour ambition de dépasser la phase d'occupation et de prendre en compte le cycle de vie complet. De plus, ces réglementations de s'intéressent qu'à un seul aspect étant la consommation d'énergie. Nous voulons étudier l'ensemble des différents impacts sur l'environnement importants et connus. Enfin, les études actuelles sur lesquelles se basent les normes énergétiques sont réalisées uniquement à l'échelle du bâtiment. Nous souhaitons élargir la réflexion à l'échelle du quartier car il nous paraît évident que les enjeux environnementaux de demain se régleront à l'échelle urbaine. Nous pensons que ce type d'approche constitue la suite logique des réglementations actuelles et qu'il est important de franchir le pas. C'est seulement grâce à ce type d'analyse du berceau à la tombe qu'il est possible de

juger du réel aspect durable d'une construction. En effet, nous pouvons nous attendre à ce que le coût environnemental de l'énergie diminue ainsi que les consommations dans le secteur du bâtiment. De ce fait, la part relative des phases autres que celles d'occupation dans le bilan environnemental global ne vont cesser d'augmenter.

Différentes méthodes permettent de dresser le bilan environnemental d'une construction. Certaines méthodes utilisent des modèles statistiques, d'autres des simulations. A l'échelle du bâtiment, la méthode de l'analyse du cycle de vie (ACV) fait partie des méthodes scientifiques clairement validées et elle est même standardisée au niveau européen. C'est actuellement l'unique approche scientifiquement solide permettant d'effectuer un bilan environnemental à l'échelle du bâtiment. Elle permet une étude quantitative des constructions sur l'entièreté de leur cycle de vie. La plupart des études scientifiques sur le sujet utilisent cette méthode (J.E. Anderson et al., 2011). C'est une méthode de plus en plus utilisée à l'échelle du bâtiment depuis les 25 dernières années. Cependant, son utilisation à l'échelle urbaine ou du quartier est récente (Marc Lotteau et al., 2015a).

Malgré la nouveauté de l'application de l'ACV à l'échelle du quartier, nous la jugeons la plus aboutie et la plus à même de nous servir pour notre présente étude. D'autre part, c'est un défi et un sujet de recherche passionnant de tester l'application de la méthode de l'ACV maintenant très précise pour les bâtiments à l'échelle du quartier, d'autant qu'aucune autre étude à notre connaissance n'a porté sur la comparaison d'autant de paramètres et d'indicateurs.

1.6. Structure du mémoire

Le présent mémoire s'articulera en quatre temps. Premièrement, la phase d'introduction, se terminant avec ce paragraphe, présente les motivations et les objectifs du travail et introduit la méthode principale utilisée : l'analyse du cycle de vie. Le deuxième chapitre a pour but de présenter cette méthode en détail. Nous décrirons premièrement la méthode générale de l'analyse du cycle de vie, puis par ses applications à l'échelle du bâtiment et du quartier. Nous vous ferons part, pour chaque échelle d'application, des limites de la méthode et des principaux résultats dégagés par notre étude de l'état de l'art. Dans un troisième temps nous expliciterons la méthodologie et l'outil informatique que nous utiliserons pour mener à bien notre travail. Enfin, nous présenterons notre étude à proprement parlé et les résultats de celle-ci. Nous terminerons bien évidemment par les conclusions à tirer des résultats obtenus. Nous vous souhaitons une bonne lecture.

Chapitre 2: L'Analyse du Cycle de vie – Etat de l'art

Dans ce deuxième chapitre, nous présenterons de manière générale la méthode de l'analyse du cycle de vie (ACV) et les normes qui la régissent. Nous étudierons l'application de cette méthode au secteur du bâtiment, à l'échelle d'une seule construction, puis à l'échelle du quartier. Nous inclurons dans cette présentations les résultats de notre recherche documentaire.

2.1. Définition

L'ACV est une méthode, un outil d'ingénierie, initialement développée pour l'industrie. Elle vise à quantifier les impacts environnementaux générés par un produit, un système, ou une activité. Cela nécessite l'analyse des consommations en matériaux, en énergie et des émissions dans l'environnement, tout au long du cycle de vie (Allacker et al., 2010 ; Commission européenne, 2010). On considère comme impact environnemental toute conséquence potentielle sur l'environnement naturel, la santé humaine et l'épuisement des ressources naturelles (Simonen, 2014). Ainsi, l'ACV est un processus objectif qui permet de mettre en place différents moyens visant à garantir un respect accru de l'environnement (Gervasio et al., 2014).

2.2. Historique

Dressons un bref historique de l'analyse du cycle de vie d'après Buyle et al. (2013). Les premières ACV datent des années 70. Elles se développent premièrement aux Etats-Unis, et concernent des biens de consommation courante sans grand impact de la phase d'utilisation. D'après Guinée et al. (2002), une des premières études (non publiée) concerne les canettes d'aluminium et est menée par le Midwest Research Institute (MRI) pour The Coca Cola Company.

Au début des années 80, les réflexions prenant en compte tout le cycle de vie commencent à s'intéresser au domaine de la construction. Différentes études utilisent des méthodes, approches et terminologies divergentes. Il y a un clair manque de discussion scientifique et de concertation sur le sujet. De plus, les résultats sont douteux car souvent utilisés à des fins commerciales, ce qui ne fait pas bonne presse à l'ACV (Guinée et al., 1993).

Dans les années 90, on voit apparaître de plus en plus d'approches multicritères de type écobilans ou bilans environnementaux qui étudient l'ensemble du cycle de vie des produits. Ces méthodes commencent à se standardiser, des conférences sont organisées et de plus en plus de publications scientifiques s'intéressent au sujet. La « Society of Environmental Toxicology and Chemistry » (SETAC) joue un rôle important dans ces avancées. Elle mène l'harmonisation des méthodes et des procédures, et va concrétiser ses travaux par la publication d'un code de bonnes pratiques.

Depuis 1994, l'« International Organisation for Standardisation » (ISO) s'implique aussi dans le domaine de l'analyse du cycle de vie et publie pour la première fois en 1997 sa norme ISO 14040 sur l'harmonisation des procédures. Le résultat de cette harmonisation est la création d'une méthodologie générale qui permet de comparer les différentes études de manière plus évidente.

A partir du début du 21^e siècle, l'intérêt pour l'ACV et les réflexions sur le cycle de vie complet ne cessent d'augmenter. De plus en plus d'études scientifiques sont publiées. Depuis, l'intérêt pour l'ACV appliquée au secteur du bâtiment est croissant, en plus des normes ISO, le SETAC publie en 2003 un état de l'art sur l'ACV appliquée aux bâtiments et à la construction. Cet état de l'art pointe les différences entre la méthode générale de l'ACV et celle appliquée aux constructions. Il met en évidence le manque de précision des normes ISO pour le problème spécifique de l'ACV des bâtiments. Le processus de standardisation continue alors grâce aux deux organismes majeurs que sont l'ISO et le Comité Européen pour la Standardisation (CEN).

Dans le prolongement de ces approches, le développement des normes internationales ISO 14040 et ISO 14044, en 2006, a défini de manière encore plus précise la méthode générale de l'ACV. Nous nous baserons sur ces normes pour présenter la méthode. L'Union Européenne affirme également son intérêt pour le sujet en publiant son « International Reference Life Cycle Data System Handbook » (ILCD), un guide pratique pour l'ACV publié en 2010 et complémentaire aux normes ISO (Wolf et al. 2012). En 2012, le CEN TC350 (Technical Committee on sustainability assessment of construction works of the European normalisation center), comité technique de l'Union Européenne s'intéressant à l'analyse de la qualité environnementale dans le secteur de la construction, publie une norme européenne encadrant l'évaluation environnementale des bâtiments, notamment via l'ACV. Aujourd'hui, l'ACV est reconnue pour être l'outil

d'évaluation multicritères le plus abouti et le plus objectif concernant les impacts environnementaux et ce jusqu'à l'échelle du bâtiment entier (Reiter, 2010).

2.3. Méthode générale

L'ACV permet notamment de mener différents types d'études comparatives (Reiter, 2010) :

- Comparaison de deux systèmes sur l'ensemble ou une partie de leur cycle de vie
- Comparaison entre différentes phases du cycle de vie
- Comparaison de deux versions différentes d'un même système
- Comparaison d'un système à une référence

La méthode permet également de quantifier un impact environnemental sur le cycle de vie complet d'un produit ou seulement sur une étape du cycle sans forcément faire de comparaison.

Ainsi, c'est un outil qui peut servir d'aide à la décision mais qui permet également de cibler les phases du cycle de vie d'un produit qui nécessiteraient d'être retravaillées dans une optique de respect de l'environnement. De nombreux systèmes de certification de construction durables sont basés sur des ACV de matériaux de construction tels que BREEAM, DGNB ou Valideo en Belgique (Wald, 2014).

Une telle approche permet de faire des choix qui traduisent une vision à long terme et qui pousse chaque acteur à assumer ses responsabilités environnementales (Nations Unies, 2004).

Le cadre normatif de l'ACV est décrit dans les normes internationales ISO 14040 (ISO, 2006a) et ISO 14044 (ISO, 2006b). Il définit 4 différentes étapes à suivre :

- La définition de l'objectif, du champ d'étude
- L'analyse de l'inventaire, « Life Cycle Inventory » (LCI)
- L'évaluation des impacts, « Life Cycle Impact Assessment » (LCIA)
- L'interprétation des résultats

Ces phases s'organisent indépendamment de manière itérative comme illustré Figure 1 (ci-dessous). Ainsi, certaines définitions faites à un état d'avancement donné de l'étude peuvent être réadaptés par la suite.

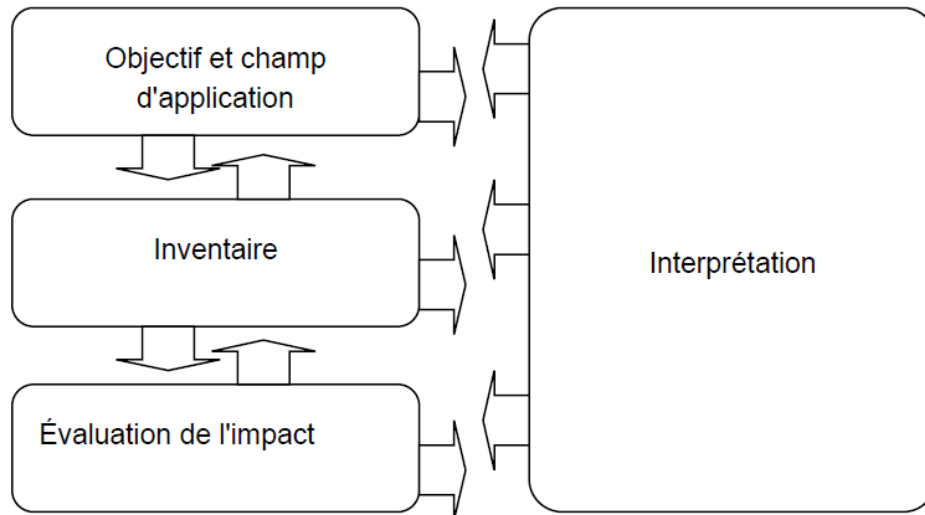


Figure 1: Etapes de l'ACV selon l'ISO 14044 (ISO, 2006b)

Nous allons détailler ces différentes étapes.

2.3.1. Objectif et champ d'application

C'est la première étape du processus et elle est primordiale. Elle consiste à définir le but de l'étude, ses objectifs, l'unité fonctionnelle et les frontières du système. Cela va permettre de définir le niveau de détail jusqu'au quel l'analyse va être menée, l'étendue de cette analyse et le type de résultats à atteindre (ISO 14044, 2006a).

Concernant les objectifs, il s'agit premièrement d'explicitier de manière claire la ou les applications de l'étude. Elles peuvent être multiples et même couplées à des considérations sociales ou économiques. Définir le but de l'étude permet d'en choisir la méthodologie, les hypothèses et leurs limitations. Il faut également expliciter les raisons motivant l'étude et son contexte. Cela permet de définir le niveau de détail adéquat. Il faut présenter le public visé. Ainsi nous adapterons la forme et le niveau technique à celui-ci. Enfin, il convient de mentionner les acteurs de l'étude, les demandeurs et ceux qui la financent. Il est important que ceux-ci n'influencent pas les résultats obtenus. (Menet et al., 2014 ; Buyle et al. 2013).

Le champ d'étude ou champ d'application, est défini par le choix d'une unité fonctionnelle et la définition des frontières du système.

2.3.1.1. Unité fonctionnelle

Le champ d'étude d'une ACV doit obligatoirement définir clairement les fonctions du système étudié. L'unité fonctionnelle précise la fonction et les caractéristiques du produit servant d'unité de référence pour l'interprétation de l'ACV. Elle permet de définir une référence suivant laquelle les entrants et sortants sont comptabilisés. Il est important de conserver la même unité fonctionnelle pour pouvoir comparer différentes solutions ou différentes analyses (Gervasio et al., 2014 ; ISO 14040, 2006a, ISO 14044, 2006b).

Ex : Pour l'étude d'un matériau isolant, l'unité fonctionnelle peut être : « limiter les déperditions thermiques à hauteur de $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ sur 1m^2 de parois durant 50 ans ».

2.3.1.2. Frontières du système

Les frontières du système ont pour but de définir les limites des processus devant être inclus dans l'analyse. C'est-à-dire ce que l'on prend en compte ou ce que l'on néglige. Ainsi, on fixe les étapes du cycle de vie qui vont être étudiées. En fonction du but de l'étude, on peut trouver des analyses se concentrant uniquement sur les phases initiales du processus de production, « du berceau à la porte de l'usine » ou des études portant sur tout le cycle de vie « du berceau à la tombe ». Quand en plus la phase de recyclage est incluse dans l'étude, on ferme complètement le cycle et on parle alors de « berceau à berceau » (Gervasio et al., 2014 ; ISO 14040, 2006a, ISO 14044, 2006b).

Le choix des frontières du système va déterminer les flux entrant et sortant. Il est préférable de choisir ces frontières de manière à ce qu'elles soient uniquement traversées par des flux élémentaires.

2.3.2. Inventaire du cycle de vie (LCI)

C'est dans cette partie qu'il convient de collecter, définir et décrire les données et les procédures de calcul choisies pour quantifier les entrants et sortants du système. Il s'agit des ressources consommées et des émissions faites dans l'eau, l'air ou le sol. Les données, qu'elles soient qualitatives ou quantitatives, sont recueillies pour les entrées et sorties de chaque processus compris dans les frontières du système définies précédemment (Gervasio et al., 2014 ; ISO 14040, 2006a, ISO 14044, 2006b, Reiter, 2010).

L'inventaire passe par un bilan des flux qui doit être fait de manière rigoureuse en suivant différentes étapes (Reiter, 2010) :

- Effectuer une description précise des différents processus du système.
- Inventorier les flux entrants et sortant pour chaque processus sur base de rendements, distances ou consommations par exemple. Il peut s'agir de manières premières, d'énergie, de terre, d'eau, d'émissions de gaz, de rejets de produits solides, dans n'importe quel milieu.
- Référencer les données nécessaires à l'inventaire (décrire les sources utilisées)
- Quantifier les émissions liées à chaque processus élémentaire
- Agréger les flux élémentaires : on additionne les données des différents processus suivant la source d'impact. Par exemple, toutes les émissions de CO₂ provenant de tous les processus élémentaires sont additionnées.
- Définir et justifier les hypothèses de calcul

2.3.2.1. Choix des données

Le choix des données utilisées durant l'étude est crucial, il va définir la validité de tout le reste de l'étude. Leur recueil peut être très lourd. Cependant, les données sont la base quantitative de l'étude. Elles doivent être précises et représentatives. Concrètement, les données proviennent de bases de données commerciales, universitaires ou nationales. Il est indispensable de décrire avec précision la source initiale des données utilisées. L'une des plus fréquemment utilisées est la base de données suisse Ecoinvent qui référence plusieurs milliers de flux. Elle est souvent adaptée au pays dans lequel l'étude prend place. Par exemple, les informations concernant les distances de transport entre l'usine, revendeur et le chantier sont adaptées (Gervasio et al., 2014 ; ISO 14040, 2006a, ISO 14044, 2006b).

Pour chaque produit ou procédé, les bases des données fournissent l'inventaire du cycle de vie quantifié, les consommations en énergie et en matériaux et les émissions dans l'environnement.

2.3.3. Evaluation de l'impact (LCIA)

Pour la plupart des problèmes environnementaux actuels tels que le réchauffement climatique, le dépérissement des forêts, l'épuisement des ressources ou les effets sur la santé, il existe un indicateur permettant d'évaluer les impacts environnementaux résultant de choix techniques (Peuportier et Polster, n.d.). L'évaluation de l'impact est l'étape durant laquelle les effets environnementaux sont quantifiés, sur base de l'inventaire.

Trois étapes sont nécessaires (Buyle et al, 2013) :

- La sélection des catégories d'impact suivant le but de l'étude
- L'agrégation des résultats de l'inventaire de catégories d'impact (classification)
- Le calcul des indicateurs correspondants à chaque catégorie

Concrètement, il s'agit de choisir les impacts à évaluer et de les classer en catégories d'impact selon leurs potentielles conséquences sur l'environnement ou sur la santé humaine. Certains impacts différents peuvent être regroupés en catégories selon un calcul d'équivalence. Par exemple, on agrège souvent les différents gaz à effets de serre émis via leur équivalent carbone dans une catégorie « changements climatiques » par exemple (Buyle et al, 2013).

On définit ces catégories de manière à ce qu'elles soient représentatives des problématiques de société actuelles que l'on veut traiter. Pour chaque catégorie, on détermine un indicateur d'impact environnemental. Tous ces choix sont dépendants de l'objectif de l'ACV défini en amont du processus (Buyle et al, 2013).

La méthode générale attribue à chaque impact un facteur de caractérisation qui représente la contribution relative de cet impact à l'indicateur de la catégorie auquel il appartient. Ainsi les catégories sont des fonctions linéaires se présentant sous la forme (Gervasio et al., 2014) :

$$impact_{cat} = \sum_i m_i \times charact_factor_{cat,i}$$

Avec m_i : quantité de flux de l'inventaire i et $charact_factor_{cat,i}$: facteur de caractérisation du flux de l'inventaire i pour la catégorie d'impact

Voici les principaux indicateurs d'impacts environnementaux utilisés dans les ACV appliquées au bâtiment :

Indicateur	Unité
Potentiel de réchauffement global, GWP	kg d'équiv. CO ₂
Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique, ODP	kg d'équiv. CFC 11
Potentiel d'acidification des sols et de l'eau, PA	kg d'équiv. SO ₂ ⁻
Potentiel d'eutrophisation, PE	kg d'équiv. (PO ₄) ³⁻
Potentiel de formation d'ozone troposphérique, POCP	kg d'équiv. éthène
Potentiel d'épuisement pour les ressources abiotiques non fossiles ; (ADP-éléments)	kg d'équiv. Sb
Potentiel d'épuisement pour les ressources abiotiques fossiles (ADP-combustibles fossiles)	MJ

Tableau 1: Indicateurs d'impact environnementaux tels que spécifiés dans la norme EN15978 (CEN,2011a)

Nous détaillerons la signification de ces indicateurs et leurs méthodes de calcul dans la partie portant sur l'ACV appliquée au bâtiment.

Il existe deux types de méthodes principales utilisées pour catégoriser les impacts. Les premières sont les méthodes orientées problème. On se focalise ici sur les impacts de premier ordre « mid-point », c'est-à-dire par exemple les émissions de gaz à effet de serre. Les méthodes orientées dommages « end-point » visent à agréger les impacts en fonction de leur conséquence finale. Elles vont ainsi le plus loin possible dans la chaîne de cause à effet. Leur avantage est de montrer clairement l'impact final, par exemple sur la santé humaine (cancer, cataracte, etc.). Cependant il peut s'avérer compliqué de remonter la chaîne de cause à effet, en particulier dans les systèmes biologiques. Par conséquent la précision de telles méthodes est variable et les méthodes orientées problèmes sont souvent préférées par les scientifiques, d'autant plus qu'elles ne suppriment pas la possibilité de cheminer à partir d'elles vers l'impact final à posteriori (Gervasio et al., 2014 ; ISO 14040, 2006a, ISO 14044, 2006b).

Deux autres étapes optionnelles peuvent être ajoutées au LCIA (Buyle et al., 2013 ; Reiter, 2010) :

- Une étape de normalisation consistant à comparer les résultats des différents indicateurs à une référence. Par exemple l'impact environnemental moyen d'un citoyen européen.
- Une étape de pondération consistant à convertir tous les indicateurs en un seul indicateur global en les pondérant. On trouve souvent comme indicateur global une valeur de monétarisation des impacts. La monétarisation attribue une valeur monétaire aux divers impacts environnementaux. Par exemple, €/kg d'émission de CO₂.

Cela permet de mesurer l'importance relative des différents indicateurs dans le but d'obtenir un score chiffré unique facilitant la prise de décision ou la présentation des résultats. Cependant, des incertitudes importantes rendent imprécises ces méthodes et c'est également un moyen d'influencer fortement les résultats finaux en fonction des choix de pondération. Ainsi, selon les normes ISO, il est interdit d'avoir recours à la pondération sans également présenter les résultats bruts, dans le cas d'une diffusion vers le public (Reiter, 2010).

De manière générale, notons que même si les normes ISO définissent la méthode générale de l'ACV, les techniques exactes de calcul des impacts environnementaux n'y sont pas définies (Buyle et al., 2013).

2.3.4. Interprétation

La dernière phase de l'ACV est l'interprétation des résultats. Elle vise à tirer des conclusions précises et vérifiées de l'étude menée. Pour cela, les résultats sont analysés et interprétés en quatre étapes (Reiter, 2010) :

- Identifier les résultats significatifs
- Les vérifier quant à leur complétude, leur sensibilité et leur cohérence
- Expliquer leurs limitations
- Conclure et formuler des recommandations

Il faut être attentif à la complétude des résultats. Ceux-ci sont exprimés sous forme de données qui représentent en même temps des impacts potentiels et des flux physiques. Les résultats extraits de l'étude doivent être transparents, respecter la définition du champ d'étude, complets et compréhensibles (Reiter, 2010).

2.3.5. Limites de la méthode

La méthode générale de l'ACV étant désormais explicitée, intéressons-nous à ses limites. Ainsi, nous mettons en avant certains points, certains aspects auxquels il nous faudra être attentif afin que notre étude soit la plus fiable possible. Bien que, comme nous l'avons dit précédemment, l'ACV soit une méthode scientifique rationnelle et complète clairement validée, elle possède quelques limitations (Reap et al., 2008).

En préambule, il est évident qu'il faut être critique sur la manière dont la méthode est appliquée. La méthode de l'ACV est générale, sa mise en pratique peut être complexe. Ainsi différentes erreurs peuvent être commises dans le choix de l'unité fonctionnelle, des frontières du système, la sélection des scénarii considérés et ainsi avoir un impact important sur les résultats obtenus. En effet, en définissant l'unité fonctionnelle, il faut sélectionner les fonctions à inclure ou non et le moyen de les quantifier parmi une multitude de possibilités. Il en est de même concernant le choix des frontières. Quels processus inclure ou exclure ? (Reap et al., 2008). Ces choix cruciaux doivent être pris minutieusement et être vérifiés à plusieurs reprises afin d'obtenir les résultats les plus fiables possibles.

Selon Finnveden (2000), la critique la plus importante que nous pouvons formuler à l'encontre de la méthode de l'ACV, d'un point de vue scientifique, est son manque de reproductibilité. En effet, différentes analyses, menées de manière comparable et sur un même produit peuvent conduire à des résultats différents et parfois même contradictoires. Il est ainsi quelques fois difficile de se prononcer sur la préférence environnementale d'un produit par rapport à un autre. Cela est dû à la complexité de la méthode et à plusieurs

variations dans différents paramètres et hypothèses pris en compte dans les différentes études. Nous allons exposer ces problématiques dans cette partie.

La première source de confusion est le choix de l'unité fonctionnelle. Comme nous l'avons expliqué, c'est un choix qui va conditionner tout le reste de l'étude. Ainsi, une unité fonctionnelle mal définie rendra bancal toute une étude.

Un autre facteur important est le choix des impacts environnementaux considérés. Différentes études peuvent étudier différents impacts. Ainsi, il devient compliqué de comparer ces études. De plus, rien ne nous indique que tous les impacts environnementaux pertinents sont considérés dans notre étude. Cela limite les conclusions pouvant être tirées. Les conclusions doivent forcément être limitées aux impacts considérés et non prétendre qu'un produit est environnementalement moins nocif qu'un autre (Finnveden, 2000). En effet, nous pouvons passer à côté d'une potentielle source de pollution, qui fausserait nos résultats.

Concernant le choix des catégories d'impact, il est aussi nécessaire d'être conscient des avantages et inconvénients de chacune. Le choix d'une méthode orientée problème (« mid-point »), en amont de la chaîne de cause à effet, donnera des résultats plus justes, cependant, ceux-ci peuvent être moins pertinents environnementalement. Au contraire, une méthode orientée dommages (« end-point ») apportera plus d'incertitudes mais sera plus pertinente et parlante d'un point de vue environnemental. Chaque catégorie d'impact doit être basée sur de solides connaissances scientifiques afin d'être calculée correctement. Par exemple, les résultats concernant les impacts toxicologiques sur l'organisme humain ou les dommages éco-toxicologiques ne sont que peu fiables à l'heure actuelle, du fait du grand nombre de produits chimiques utilisés dans nos sociétés et de leurs potentielles synergies. Il en est de même des impacts provoqués par la consommation de sol car la méthode pour les calculer n'est pas précisément définie. Il y a donc des précautions à prendre vis-à-vis de la fiabilité des résultats et des effets connus ou non sur l'environnement (Finnveden, 2000).

De plus, de nombreuses catégories d'impact souffrent d'un manque de standardisation de leurs méthodes de calcul (Reap et al., 2008). Cela peut provoquer une méfiance et la mise de côté de certains impacts par les chercheurs, dont les études ne seront alors pas aussi complètes qu'elles le devraient. Ainsi, la barrière principale à la qualité des modèles d'impact et la connaissance scientifique (ISO 2000a, 2006b). De nouveaux produits chimiques apparaissent chaque jour et leurs mécanismes de dispersion dans l'environnement ne sont pas toujours connus ou bien modélisés (Reap et al., 2008).

Une autre limite importante de l'ACV est la qualité des données utilisées. De grandes différences peuvent être constatées entre les différentes bases de données. Cela s'explique entre autres par des divergences dans les procédures de calcul ou des différences technologiques entre les usines (parfois d'un même pays), conduisant à des émissions différentes (Finnveden, 2000).

On observe également souvent certains problèmes concernant la fourchette temporelle considérée. L'ACV intègre les impacts environnementaux sur une période de temps donnée. Par exemple, un site d'enfouissement de déchets va émettre des gaz durant une très longue période de temps (plusieurs milliers d'années). Le choix de l'échelle de temps étudiée va conduire à des résultats sensiblement différents (Finnveden, 2000).

Il est à noter que les spécificités locales sont également rarement prises en compte. Ignorer les variations spatiales (différences géologiques, topographiques, météorologiques), l'unicité du milieu dans lequel l'étude se déroule (pH du sol), et les dynamiques environnementales locales mène à d'inexactes estimations des potentiels dommages environnementaux (Reap et al., 2008). En effet, l'impact d'une forte consommation de sol par exemple ne sera pas le même sur un site classé pour sa faune et sa flore que sur un site classique.

Enfin, il faut évidemment être critique vis-à-vis des différentes méthodes de pondération des impacts qui visent à produire une valeur unique en agrégeant tous les indicateurs. Vis-à-vis des objectifs d'une étude, un indicateur peut être plus défavorable qu'un autre. Il est alors utile d'agréger les catégories d'impact pondérées dans un score unique dans un but de prise de décision. Cependant, il est possible de faire dire à une étude deux choses complètement contradictoires en pondérant différemment les résultats.

En conclusion, la plus grande faiblesse de l'ACV est le fait qu'elle puisse générer différents résultats pour une même étude. Les résultats d'une ACV ne sont donc pas des valeurs absolues et ne peuvent donc pas servir de certification à elles seules. Une ACV ne garantit pas l'aspect renouvelable d'un produit ou d'un service. Cependant la méthode est totalement valable pour comparer différents produits ou processus (Buyle et al., 2013). C'est ce que nous allons justement faire dans ce mémoire.

Une fois ces limites pointées, il convient d'en prendre compte dans notre étude. Il est cependant bon de rappeler que la standardisation de la méthode de l'ACV et les harmonisations de plus en plus poussées notamment à l'échelle européenne réduisent actuellement fortement les problèmes évoqués dans cette partie. De plus la qualité des bases de données est en constante amélioration. Il est également important de rappeler que ces limites ne sont pas spécifiques à l'ACV mais concernent également les autres méthodes d'analyses environnementales (Finnveden, 2000).

Maintenant que nous avons présenté la méthode générale de l'analyse de cycle de vie, étudions la manière dont elle s'applique au domaine du bâtiment.

2.4. L'analyse du cycle de vie appliquée au bâtiment

Concernant l'ACV appliquée au domaine de la construction, deux échelles sont à différencier (Chevalier, 2009) : celle des matériaux et produits de construction et celle des bâtiments et ouvrages de construction. Nous ne développerons pas les détails de la méthode appliquée aux matériaux de constructions. Elle est assez semblable à la méthode générale présentée précédemment. Nous nous concentrerons ici sur l'adaptation de la méthode à l'échelle du bâtiment.

Il faut bien comprendre que l'impact environnemental d'un bâtiment n'est pas la simple addition des impacts de ses composants. En effet, il existe des interactions en les différents composants tel que par exemple le rayonnement solaire transmis par un vitrage qui est stocké dans l'enveloppe ou les dalles de plancher et qui va influencer la consommation de chauffage. Les consommations d'énergie et d'eau sont bien sûr incluses dans l'ACV et c'est là tout l'intérêt d'appliquer cette méthode à l'échelle du bâtiment (Reiter, 2010).

Comme nous l'avons vu précédemment, le secteur de la construction est soumis à des exigences croissantes concernant son aspect durable. Cependant, les acteurs du projet de construction n'ont pas toujours les connaissances suffisantes pour être capables de statuer sur les performances environnementales d'un produit de construction. Les notions de performance thermique contraignent de plus en plus les architectes et ceux-ci ont maintenant une bonne maîtrise de la phase d'utilisation. Par contre, les notions d'énergie grise et d'empreinte carbone des matériaux, qui sont petit à petit intégrées aux appels d'offres, sont moins connues, même chez les professionnels. C'est pourquoi il est nécessaire d'encourager l'utilisation de méthodes telles que l'ACV dans le secteur du bâtiment (Gervasio et al., 2014).

A l'origine, l'AVC a été conçue pour être appliquée à des processus et des produits industriels. Cependant, c'est une méthode de plus en plus utilisée dans le secteur du bâtiments (J. Chevalier, 2009). La méthode est adaptée pour la première fois à ce domaine en Suisse en 1986 et ne cesse de se perfectionner depuis (B. Peuportier, 2015). Grâce à cette méthode il est possible d'évaluer l'impact environnemental d'une construction tout au long de sa vie, de l'extraction des matières premières à la démolition et même le recyclage. Ainsi, il n'est aucunement possible de transférer les poids

environnementaux d'une phase du cycle de vie à une autre ou d'un milieu à un autre (Nations Unies, 2004).

2.4.1. Méthode

Si la méthode de l'ACV est très bien développée pour l'industrie, son application au bâtiment est cependant plus complexe. Cela dit, la standardisation et la fiabilité des données ne cessent de progresser si bien que l'ACV à l'échelle du bâtiment est une méthode de plus en plus fiable. Les normes européennes harmonisées du CEN/TC 350 que sont la EN 15978 (CEN, 2011a) et la EN 15804 (CEN, 2012) dictent des méthodes normalisées afin d'évaluer les performances environnementales des bâtiments et des matériaux selon une approche du cycle de vie (Gervasio et al., 2014). En voici les principales recommandations :

2.4.1.1. *Equivalent fonctionnel*

Selon la norme, l'équivalent fonctionnel doit correspondre aux « exigences fonctionnelles et/ou exigences techniques quantifiées pour un bâtiment ou un système assemblé (partie d'ouvrage), destinées à être utilisées comme base de référence pour la comparaison ». Ainsi, deux ACV ne peuvent être comparées seulement si elles sont définies selon la même unité fonctionnelle. Dans le cas d'un bâtiment, l'unité fonctionnelle est difficile à définir. Les normes demandent d'inclure dans l'équivalent fonctionnel plusieurs informations (Gervasio et al., 2014 ; CEN, 2011a ; CEN, 2011b ; CEN, 2012) :

- L'affectation du bâtiment (bâtiment de bureaux, résidentiel, etc.)
- Le profil d'utilisation
- Les exigences techniques et fonctionnelles pertinentes
- La durée de vie requise

Nous l'avons évoqué dans les limites de la méthode générale de l'ACV, le choix de l'unité fonctionnelle est primordial et conditionne toute la suite de l'étude et les possibilités de comparaison avec d'autres études. A l'échelle du bâtiment, ce choix est complexe. En effet, l'unité fonctionnelle choisie est souvent le bâtiment entier ou la surface nette habitable. Cependant, si l'on choisit le bâtiment complet, il est alors impossible de comparer notre étude avec une autre portant sur un bâtiment ayant une autre fonction par exemple (Buyle et al., 2013). Cuéllar-Franca et Azapagic (2012) nous montrent qu'en fonction du choix de l'unité fonctionnelle, surface habitable ou nombre d'habitant, les résultats de l'étude peuvent être complètement contradictoires.

2.4.1.2. Frontières du système

Définissons plus clairement les différentes étapes du cycle de vie d'un bâtiment. Comme la norme l'indique : l'ACV « inclut tous les processus en amont et en aval nécessaires pour établir et préserver les fonctions du bâtiment ». Ainsi, il est indispensable d'avoir à disposition les informations nécessaires sur les différents produits intégrés au bâtiment étudié (Gervasio et al., 2014).

Comme nous l'avons évoqué précédemment, le cycle de vie comprend toutes les étapes de la vie d'un produit mais aussi de tous ses composants et les matières qui les composent, de leur extraction jusqu'à leur recyclage éventuel, d'où la notion de cycle.

Dans le cas du bâtiment, les différentes phases du cycle de vie sont les suivantes (Gervasio et al., 2014, CEN, 2011a) :

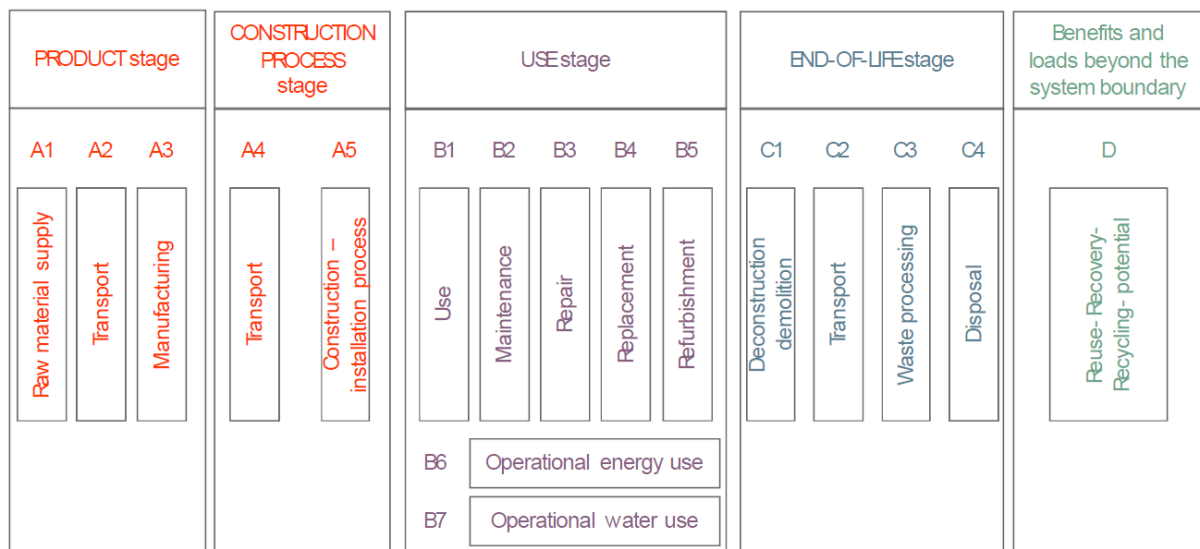


Figure 2: Phases du cycle de vie du bâtiment selon la norme EN 15978 (CEN, 2011a)

- **La phase de production** (modules A1 à A3) : La phase de production est la phase où les frontières du système avec l'environnement sont définies dans le but d'inclure les différents processus fournissant les intrants en termes de matière et d'énergie dans le système. Ces intrants seront utilisés par la suite dans les processus de fabrication et de transport jusqu'à la porte de l'usine mais aussi potentiellement dans les processus de traitement des déchets. La phase de production inclut l'extraction et le traitement des matières premières, la réutilisation dans le cas échéant de matières premières issues d'une construction précédente et le traitement des matériaux secondaires nécessaires à la production des produits de construction. Elle inclut aussi le transport jusqu'à la porte de l'usine de production et le transport interne à l'usine, la production des produits et énergies auxiliaires et la fabrication des emballages.

- **La phase de construction** (modules A4 et A5) : Elle inclut le transport depuis l'usine jusqu'au site de construction, le montage de produits sur le bâtiment, les processus de fabrication et de transport des intrants nécessaires à la construction (énergie, eau) et les opérations de transformation des produits sur site.
- **La phase d'utilisation** (modules B1 à B7) : Elle comprend deux types de composantes. Celle liée à la structure du bâtiment et celle liée à l'exploitation de celui-ci. Nous comptabilisons l'utilisation des produits installés en termes d'émissions dans l'environnement des composants du bâtiments, d'énergie et d'eau consommée nécessaire au fonctionnement des systèmes techniques intégrés (chauffage, refroidissement, éclairage, etc.) ainsi que les impacts environnementaux liés à ces consommations, y compris le traitement et le transport des déchets engendrés sur le site par ces consommations. Mais il faut aussi prendre en compte les composantes de maintenance, de réparation, de remplacement et de réhabilitation du bâtiment et de ces systèmes techniques. Ces composantes visent à intégrer la combinaison de toutes les actions techniques ou administratives menées dans le but de rendre à un produit de construction installé dans le bâtiment son état fonctionnel requis.
- **La phase de fin de vie** comprend tous les extrants issus de la déconstruction (démontage, démolition et tri des matériaux), le transport des produits mis en rebus vers les sites de recyclage et d'élimination adaptés et l'élimination et le traitement des déchets en eux-mêmes.

Enfin, il est possible d'inclure à l'étude les bénéfices liés à la réutilisation des matières qui le permettent, leur recyclage ou leur valorisation énergétique (module D).

Les normes européennes harmonisées définissent trois types d'ACV suivant les frontières qu'elles définissent (Reiter, 2010 ; CEN, 2011a ; CEN, 2012) :

- Du berceau à la porte de l'usine (« cradle to gate »), incluant les phases de production et de transport vers l'usine (modules A1 à A3 sur la Figure 2)
- Du berceau à la porte de l'usine plus options (« cradle to gate with options »), identique au « cradle to gate » mais pouvant inclure d'autre phases telles que, par exemple, la fin de vie (modules C1 à C4).
- Du berceau à la tombe (« cradle to grave »), où toutes les phases sont incluses (modules A1 à C4).

Un quatrième module (module D), facultatif, permet d'intégrer le recyclage (« cradle to cradle »).

Dans le cas d'une ACV à l'échelle du bâtiment, les normes préconisent de toujours prendre en compte le cycle de vie complet mais la prise en compte du recyclage reste optionnelle.

2.4.1.3. Inventaire

Les différents modules ou phases du cycle de vie définis dans les normes ont été présentés précédemment (Figure 2). Chaque module a des frontières bien définies et c'est sur cette base que l'inventaire doit être fait.

2.4.1.4. Evaluation de l'impact

La norme européenne EN15978 définit sept indicateurs d'impacts environnementaux que sont :

Indicateur	Unité
Potentiel de réchauffement global, GWP	kg d'équiv. CO ₂
Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique, ODP	kg d'équiv. CFC 11
Potentiel d'acidification des sols et de l'eau, PA	kg d'équiv. SO ₂ ⁻
Potentiel d'eutrophisation, PE	kg d'équiv. (PO ₄) ³⁻
Potentiel de formation d'ozone troposphérique, POCP	kg d'équiv. éthène
Potentiel d'épuisement pour les ressources abiotiques non fossiles ; (ADP-éléments)	kg d'équiv. Sb
Potentiel d'épuisement pour les ressources abiotiques fossiles (ADP-combustibles fossiles)	MJ

Tableau 2: Indicateurs d'impact environnementaux tel que spécifié dans la norme EN15978 (CEN,2011a)

Nous allons présenter ces indicateurs principaux et leurs méthodes de calculs, tels que décrits par Gervasio et al. (2014) :

Potentiel de réchauffement global (GWP)

Cet indicateur permet d'évaluer le potentiel du produit étudié à participer à l'« effet de serre ». Cet effet résulte de certains gaz actifs sous l'effet des infrarouges naturellement présents dans l'atmosphère terrestre mais est fortement renforcé par l'émission de tels gaz par les activités humaines. Ils absorbent et réfléchissent l'énergie thermique rayonnant depuis la surface de la terre et provoquent de la sorte un réchauffement de la surface terrestre et de la troposphère. Les différents gaz à effet de serre ne sont pas identiques et si le CO₂ est le plus répandu, d'autres gaz ont un effet plus fort sur le réchauffement climatique pour une même quantité émise. Le GWP mesure

la quantité de dioxyde de carbone qui doit être émise dans l'atmosphère pour avoir le même effet radiatif qu'un kilogramme du gaz considéré. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), fournit le tableau suivant :

	20 ans	100 ans	500 ans
Dioxyde de carbone (CO ₂)	1	1	1
Méthane (CH ₄)	62	25	7
Oxyde nitreux (N ₂ O)	275	298	156

Tableau 3: Tableau du GWP pour un intervalle de temps donné (en kg CO₂ éq./kg) (GIEC,2007)

Ainsi, l'indicateur « Réchauffement global » se calcule de la manière suivante :

$$\text{Réchauffement global} = \sum_i GWP_i \times m_i$$

Avec m_i : masse du gaz i libéré (en kg)

L'indicateur est donc exprimé en kg de CO₂ équivalent.

Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique (ODP)

Certains gaz se distinguent par leur pouvoir d'endommager la couche d'ozone stratosphérique. Ils libèrent des radicaux libres qui décomposent l'ozone (O₃). Une fois endommagée, la couche d'ozone perd sa capacité à bloquer la pénétration de la lumière ultraviolette (UV) dans l'atmosphère terrestre. Or, les ultraviolets sont cancérigènes et la destruction de la couche d'ozone provoque une surexposition des êtres humains et des animaux. Ainsi augmentent le nombre de cancers de la peau ou de problèmes de cataractes. Les gaz chlorofluorocarbones et les hydrocarbures chlorofluorés (HCFC) sont parmi les destructeurs d'ozone les plus dangereux. Leurs émissions croissantes depuis les années 80 ont induit des prises d'initiatives à l'échelle planétaire ayant pour but de protéger la couche d'ozone. Ainsi le protocole de Montréal a interdit la plupart des gaz les plus destructeurs.

Le potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique est exprimé sous la forme d'un rapport entre la perte globale d'ozone provoquée par une substance et la perte globale d'ozone occasionnée par la substance de référence étant le CFC-11. C'est l'Organisation météorologique mondiale (OMM) qui a défini cet indicateur et les ODP de différents gaz. En voici quelques exemples :

	Constance (t ≈:)
CFC-11	1
CFC-10	1,2
Halon 1211	6,0
Halon 1301	12,0

Tableau 4: ODP de certains gaz (kg CFC-11 éq./kg) (Heijungs et al., 1999)

Ainsi, l'indicateur « Destruction de la couche d'ozone stratosphérique » se calcule de la manière suivante :

$$\text{Destruction de la couche d'ozone stratosphérique} = \sum_i ODP_i \times m_i$$

Avec m_i : masse de substance i émise en kg

L'indicateur est donc exprimé en kg d'équivalents CFC-11.

Potentiel d'acidification des sols et de l'eau (PA)

L'acidification des sols et de l'eau est causée par la transformation de la pollution contenue dans l'air (principalement de l'ammoniac (NH_3), du dioxyde de soufre (SO_2) et des oxydes d'azote (NO_x)) en substances acides. Les composés acidifiants émis dans l'atmosphère sont colportés par le vent et retombent au sol sous forme de particules acides qui peuvent être contenues dans les gouttes de pluies ou les flocons de neige, d'où les termes de pluies ou neiges acides. Une fois que ces pluies s'abattent, la plupart du temps à une grande distance de la source initiales des gaz polluants, elles dégradent les écosystèmes de diverses manières et à des degrés différents.

Le potentiel d'acidification des sols et de l'eau se mesure par le potentiel qu'a une substance à libérer des ions H^+ provoquant l'acidification. Il se mesure également parfois par la capacité à libérer une quantité équivalente de SO_2 .

Les facteurs de caractérisation retenus par l'Union Européenne pour l'acidification sont les suivants :

	Ammoniac (NH_3)	Oxyde d'azote (NO_x)	Dioxyde de soufre (SO_2)
APi	1,60	0,50	1,20

Tableau 5: PA de certains gaz (kg d'éq. SO_2) (Huijbregts, 2001)

L'indicateur se calcule comme il suit :

$$Acidificatoin = \sum_i PA_i \times m_i$$

Avec m_i : masse de substance i émise en kg

L'indicateur est donc exprimé en kg d'équivalents SO_2 .

Potentiel d'eutrophisation (PE)

Les engrais et fertilisants contenant des nitrates et des phosphates sont utilisés de manière massive dans l'agriculture actuelle dans le but de stimuler la croissance des plantes. Même si ces substances sont nutritives et nécessaires à la vie, leur surabondance dans les eau ou terres naturelles sensibles provoque une surproduction de plantes ou d'algues. Cette production excédentaire peut étouffer les autres organismes provoquant leur mort et leur décomposition. Ainsi, l'eutrophisation est un enrichissement excessif en éléments nutritifs des eaux. Celle-ci peut dégrader les écosystèmes et augmentant la mortalité de la faune et de la flore aquatique voir même provoquer la disparition de certaines espèces vivant dans les environnements pauvres en substances nutritives. La biodiversité des environnements victimes d'eutrophisation perd de sa richesse, ce qui a des répercussions sur la faune non-aquatique et les êtres humains.

L'eutrophisation est calculée en kilogramme équivalent d'azote ou de phosphate. Ainsi, elle détermine le potentiel d'une substance à provoquer la prolifération des algues, l'azote ou le phosphate faisant office d'unité de référence. On compte parmi les principaux responsables de l'eutrophisation les composés azotés tels que les nitrates, l'ammoniac, l'acide nitrique et les composés phosphoriques dont les phosphates et l'acide phosphorique.

En prenant le phosphate comme référence, les potentiels d'eutrophisation des quelques substances sont donnés ci-dessous :

	Ammoniac (NH ₃)	Oxyde d'azote (NO _x)	Nitrate (N)	Phosphate (P)
EPI	0,35	0,13	0,10	1,00

Tableau 6: potentiels d'eutrophisation de certaines substances (kg d'éq. PO_4^{2-}) (Heijungs et al., 1999)

Nous calculons ainsi le PE de la manière suivante :

$$Eutrophisation = \sum_i PE_i \times m_i$$

Avec m_i : quantité de substance i libérée dans l'air, l'eau ou le sol en kg

L'indicateur est donc exprimé en kg d'équivalents PO_4^{2-} .

Potentiel de création d'ozone photochimique troposphérique (POCP)

Certains gaz tels que les oxydes d'azote (NOx) ou les composés organiques volatiles (COV), des polluants courants, ont la capacité de produire de l'ozone et d'autres polluants atmosphériques en présence de rayonnements solaires. Comme nous l'avons vu précédemment, l'ozone est nécessaire dans la haute atmosphère pour assurer la protection de la surface terrestre contre les ultraviolets. Cependant, l'ozone troposphérique provoque des dommages sur les récoltes et l'augmentation des cas d'asthme et d'autres affections respiratoires. Les pollutions estivales (smogs), recouvrant les grandes agglomérations sont la mise en évidence la plus flagrante des fortes émissions de gaz qui contribuent à la création d'ozone photochimique en basse altitude. L'utilisation de combustibles dans les moteurs est la cause principale des émissions d'oxydes d'azote. Les composés organiques étant en majorité utilisés dans les peintures et autres revêtements.

La catégorie d'impact POCP nous permet de mesurer la capacité relative d'un gaz à générer de l'ozone en présence d'oxydes d'azote et de rayonnement solaire. Le POCP est calculé en se basant sur l'éthylène comme substance de référence. La Commission économique des Nations unies pour l'Europe a défini les facteurs de caractérisation pour le POCP. Ils sont calculés pour deux scénarios : une concentration de fond relativement élevée en Nox et une concentration de fond relativement faible (Heijungs et al., 1999).

	Élevée- POCP du NO _x	Faible- POCP du NO _x
Acétaldéhyde (CH ₃ CHO)	0,641	0,200
Butane (C ₄ H ₁₀)	0,352	0,500
Monoxyde de carbone (CO)	0,027	0,040
Éthyne (C ₂ H ₂)	0,085	0,400
Méthane (CH ₄)	0,006	0,007
Oxyde d'azote (NO _x)	0,028	Pas de données
Propène (C ₃ H ₆)	1,123	0,600
Oxyde de soufre (SO _x)	0,048	Pas de données
Toluène (C ₆ H ₅ CH ₃)	0,637	0,500

Tableau 7: POCP de certaines substances pour deux concentrations en NOx (kg C₂H₄éq./kg) (Heijungs et al., 1999)

L'indicateur de formation des photo-oxydants est le suivant :

$$\text{Formation de photo - oxydants} = \sum_i POCP_i \times m_i$$

Avec m_i : masse de substance i libérée en kg

L'indicateur est donc exprimé en kg d'équivalent éthylène (C_2H_4).

Potentiel d'épuisement abiotique

Cet indicateur met en avant la raréfaction des ressources non renouvelables du fait de leur extraction et de leur rareté intrinsèque. On transpose cet indicateur en deux sous types : l'ADP-éléments qui tient compte de l'extraction des ressources limitées et de leur minerais et l'ADP-énergie/combustibles fossiles qui s'intéresse aux combustibles fossiles sous leur forme de carburant ou de matière première.

On calcule le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques élémentaires ($ADP_{\text{éléments}}$) pour toute extraction d'éléments d'après ses réserves résiduelles et son taux d'extraction. Le potentiel d'épuisement abiotique est alors fonction d'un rapport entre les réserves de production et les réserves ultimes, comparé à une substance de référence étant l'antimoine (Sb) (Guinée et al., 2002). Ainsi, l' $ADP_{\text{éléments}}$ pour une ressource donnée est le rapport entre la quantité de ressources extraite et les réserves exploitables de cette ressource, rapporté en kg de ressource de référence. Voici les facteurs de caractérisation de quelques ressources :

Ressource	ADP-élément
Aluminium	1.09E-09
Cadmium	1.57E-01
Cuivre	1.37E-03
Fer	5.24E-08
Plomb	6.34E-03

Tableau 8: Potentiel d'épuisement abiotique (en éq. Sb/kg) (Guinée et al., 2002)

Nous arrivons donc à l'expression suivante :

$$\text{Epuisement abiotique} = \sum_i ADP_i \times m_i$$

Avec m_i : quantité de ressource i extraite en kg

L'indicateur est donc exprimé en kg d'antimoine.

Concernant les combustibles fossiles, les mesures sont similaires mais le calcul diffère légèrement. On prend en compte une mesure absolue, basée sur la teneur énergétique du combustible fossile (Guinée et al., 2002). La rareté n'est pas prise en compte car les combustibles sont des ressources transférables. L'unité de l'indicateur « épuisement abiotique fossile » est le MJ.

Il existe d'autres catégories d'impacts environnementaux et leurs indicateurs associés, parfois pris en compte dans d'autres méthodes d'analyses environnementales. Cependant, par manque de consensus, ils ne sont pas encore inclus dans les normes européennes. Par exemple, la méthode d'impact environnemental ReCiPe inclut les indicateurs suivants : formation de matières particulaires, radiation ionisante, toxicité humaine, écotoxicité terrestre et aquatique en eau douce et marine, occupation du sol ou transformation du territoire (Reiter, 2010).

Dans le cas de notre étude, nous calculerons certains de ces impacts complémentaires qui ne sont pas repris dans les normes mais que nous jugeons intéressants. Nous allons maintenant les présenter selon les descriptions de Peuportier et Polster (n.d.).

L'écotoxicité

L'indicateur relatif à l'écotoxicité fait partie de la famille des indicateurs de volume critique. Ils sont utilisés pour évaluer certains effets dépendants de la concentration en polluants dont les nocivités sont différentes. Etant donné ces différences de nocivité, il n'est pas possible de simplement sommer les quantités de polluants. Ainsi, une concentration maximale tolérable notée C_m (kg/m^3) indiquant que par exemple 95% des individus sont préservés est définie. On obtient alors le volume critique en divisant les émissions par C_m . Ainsi, l'écotoxicité aquatique est la somme de volumes critiques, exprimés en m^3 d'eau polluée, pour les différents polluants. Plus une substance est polluante plus C_m est faible et donc plus le volume critique, à émission donnée, est élevé. Les principales substances polluantes considérées sont les métaux tels que l'arsenic, le plomb, le mercure et les hydrocarbures. Ces indices sont appelés ECA pour le milieu aquatique (Ecotoxicological Classification factor for Aquatic ecosystems) et ECT pour le milieu terrestre (Ecotoxicological Classification factor for Terrestrial ecosystems). Ils sont exprimés respectivement en m^3 d'eau polluée ou en kg de sol pollué.

INDICATEUR D'ÉCOTOXICITÉ			
Formule	Substance	ECA	ECT
Métaux			
As	arsenic	0,2	3,6
Cd	cadmium	200	13
Cr	chrome	1	0,42
Co	cobalt		0,42
Cu	cuiivre	2	0,77
Pb	plomb	2	0,43
Hg	mercure	500	29
Ni	nickel	0,33	1,7
Zn	zinc	0,38	2,6
Hydrocarbures			
C6H6	benzène	0,029	
C6H5OH	phénol	5,9	5,3
	pentachlorophénol	5,6	5,9
	PCB-28 (polychlorobiphényle)	16	
	PCB-52	430	
	PCB-101	40	
	PCB-118	360	
	PCB-138	71	
	PCB-153	100	
	PCB-180	130	
	dioxines (eq. TCDD)		1400
	chloroforme	0,17	
	pétrole brut	0,05	

Tableau 9: Indicateurs d'écotoxicité en m^3 d'eau ou en kg de sol pollué selon l'agence américaine de protection de l'environnement (EPA) (Peuportier et Polster, n.d.)

Les odeurs

Pour évaluer l'impact relatif aux odeurs, la méthode est similaire. C_m est simplement remplacé par C_s le seuil de détection de chaque odeur, définit comme la concentration minimale telle que 50% des individus détectent la substance odorante. De manière similaire à l'écotoxicité le volume critique est obtenu en divisant les émissions par C_s et l'indicateur en sommant les volumes critiques. Il est exprimé en m^3 d'air pollué et est appelé OTV (Odour Threshold Value in air).

La toxicité humaine

La prise en compte de la toxicité humaine est un peu plus complexe. En effet, l'effet induit dépend de la dose de polluant reçue et pas de la concentration dans le milieu. Il nous faut alors connaître le rapport entre la masse de polluant ingérée ou inhalée sur une durée de temps donnée et la masse de l'individu. De plus, l'impact dépend de la densité de population autour du point d'émission mais celui-ci est difficilement localisable. C'est pourquoi une moyenne planétaire est considérée. En fonction de la population terrestre et du volume d'air dans la troposphère, de la dose journalière maximum admissible et des émissions, on calcule le poids de corps humain contaminé. Un raisonnement identique est appliqué au milieu aquatique et aux sols. Il est possible de transformer l'indicateur en nombre de personnes contaminées. Les indicateurs calculés se nomment HCA, HCW et HCS en fonction du milieu (Human toxicological Classification factor for the Air/Water/Soil). En voici les valeurs pour quelques substances :

INDICATEUR DE TOXICITÉ HUMAINE				
Formule	Substance	HCA	HCW	HCS
Métaux				
As	arsenic	4700	1,4	0,043
Ba	barium	1,7	0,14	0,019
Cd	cadmium	580	2,9	7
Cr3+	chrome (III)	6,7	0,57	0,018
Cr6+	chrome (VI)	47000	4100	130
Co	cobalt	24	2	0,065
Cu	cuivre	0,24	0,02	0,0052
Fe	fer	0,042	0,0036	
	oxydes de fer	0,067	0,0057	
Hg	mercure	120	4,7	0,15
Mn	manganèse	120		
Mo	molybdène	3,3	0,29	0,7
Ni	nickel	470	0,057	0,014
Pb	plomb	160	0,79	0,025
Sn	étain	0,017	0,0014	0,000045
V	vanadium	120		
Zn	zinc	0,033	0,0029	0,007
Composés non organiques				
NH4+	ammonium	0,02	0,0017	
Br-	bromide	0,033	0,0029	
CO	monoxyde de carbone	0,012		
CN-	cyanure (libre)	0,67	0,057	1,4
	cyanure (lié)	2,6	0,22	5,4
F-	fluorure	0,48	0,041	
H2S	sulfure d'hydrogène	0,78		
NO3-	azotate	0,0091	0,00078	
NO2-	azoture	0,26	0,022	
NOx	oxyde d'azote	0,78		
SO32-	sulfite	0,038	0,0033	
SO2	dioxyde de soufre	1,2		

Tableau 10: Indicateurs de toxicité humaine (Peuportier et Polster, n.d.)

Le potentiel de dégradation de la condition naturelle

Le (NDP pour Natural Degradation Potential) est un impact caractérisant l'utilisation du terrain faite par le nouveau quartier. Il va permettre de calculer un résultat en années multipliées par m² d'occupation d'une surface naturelle équivalente. Voici le tableau donnant les valeurs NDP de plusieurs types d'occupation du terrain :

Type d'utilisation	NDP	Type d'utilisation	NDP
Bâtiments	1	Pâturages, utilisation intensive	0,6
Ensemble urbain dense	0,95	Pâturages, utilisation extensive	0,5
Ensemble urbain peu dense	0,85	Forêts intensivement exploitées	0,4
Routes, rails et réseaux	0,9	Terrain en jachère permanente	0,3
Cultures intensives	0,8	Forêts extensivement exploitées	0,2
Cultures extensives	0,7	Prés, espaces naturels	0,1
Espaces verts urbains	0,7		

Tableau 11 : Valeurs NDP de différents types d'utilisation de terrain
(source : <http://docs.izuba.fr/v4/fr/index.php/Quartier?toc-id=715>)

Cet indicateur est calculé de la manière suivante :

$$\text{Potentiel de dégradation de la condition naturelle} = \sum_i a_i \times t_i \times NDP_i$$

Avec :

a_i = surface occupée pour un type d'utilisation i en m²

t_i = temps d'occupation pour un type i en années

NDP_i = facteur de caractérisation NDP pour un type d'occupation i

L'impact est donc donné en m²x années.

Le potentiel de dégradation de la condition naturelle dû au changement d'utilisation

Il est calculé de manière similaire. Il permet d'évaluer les conséquences d'un changement de type d'occupation du sol. Par exemple un espace de forêt étant transformé en parking. Cet indicateur se calcule de la manière suivante :

$$\text{Potentiel dû au changement} = \sum_i a_i \times t_i \times NDP_{i,pres} - NDP_{i,prev}$$

Avec :

$NDP_{i,pres}$ = NDP du type d'utilisation i de la surface sur le point d'être construite

$NDP_{i,prev}$ = NDP du type de surface i qui occupais le terrain précédemment

L'imperméabilité

L'imperméabilité moyenne des sols du quartier permet de caractériser la capacité du quartier à permettre aux eaux de pluie de s'infiltrer dans le sol ou d'être captées par de systèmes de rétention d'eau. Cette eau d'infiltration ne doit pas être collectée par les réseaux ce qui allège la charge de ceux-ci ainsi que celle des usines de traitement des eaux. Elle est calculée comme la moyenne des pourcentages de perméabilité de toutes les surfaces du site.

En plus des indicateurs d'impact environnementaux, des indicateurs concernant la consommation de ressources et la production de déchets sont calculés. Les flux entrants et sortants, inventoriés durant l'inventaire du cycle de vie, permettent de calculer les indicateurs d'utilisation des ressources, les indicateurs décrivant les déchets et ceux décrivant les flux sortants. Ils sont définis normativement au niveau européen dans la norme EN 15978 et sont :

Indicateur	Unité
Utilisation de l'énergie primaire renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières	MJ, pouvoir calorifique net
Utilisation des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées en tant que matières premières	MJ, pouvoir calorifique net
Utilisation de l'énergie primaire non renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières	MJ, pouvoir calorifique net
Utilisation des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées en tant que matières premières	MJ, pouvoir calorifique net
Utilisation de matière secondaire	kg
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables	MJ
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables	MJ
Utilisation nette d'eau douce	m ³

Tableau 12: Indicateurs d'utilisation des ressources tel que spécifié dans la norme EN15978 (CEN, 2011a)

Indicateur	Unité
Déchets dangereux éliminés	kg
Déchets non-dangereux éliminés	kg
Déchets radioactifs éliminés	kg

Tableau 13: Indicateurs relatifs aux déchets tel que spécifié dans la norme EN 15978 (CEN, 2011a)

Indicateur	Unité
Composants destinés à la réutilisation	kg
Matériaux destinés au recyclage	kg
Matériaux destinés à la récupération d'énergie (autre que l'incinération de déchets)	kg
Énergie fournie à l'extérieur	MJ par vecteur énergétique

Tableau 14: Indicateurs relatifs aux flux sortants tel que spécifié dans la norme EN 15978 (CEN, 2011a)

Energie Primaire

Nous comptabilisons l'énergie consommée sur l'ensemble du cycle de vie en termes d'énergie primaire. Ainsi, nous pouvons intégrer dans l'analyse les différents types d'énergie distribuées de manière homogène. Par principe pour une ACV il est nécessaire de remonter jusqu'aux phases d'extraction des ressources ou des combustibles (gaz, charbon, pétrole brut). Une certaine quantité d'uranium est nécessaire à la production d'un kWh d'électricité par exemple. Cette quantité est traduite en énergie primaire (MJ) et il est alors possible d'additionner les différentes contributions de manière homogène (Peuportier et Polster, n.d.).

Notons également que les étapes facultatives que sont la normalisation, la pondération ou la monétarisation ne sont pas incluses dans les normes européennes harmonisées EN 15804 et 15978 (Reiter, 2010).

2.4.2. Limites de la méthode

Si la méthode de l'ACV est très bien développée pour l'industrie, son application au bâtiment est cependant plus complexe. De nombreux facteurs complexifient sensiblement l'étude et influencent par la même occasion la crédibilité des résultats. Nous pouvons citer par exemple : la durée de vie des bâtiments (50 à 100 ans), les incertitudes sur certaines variables et certains paramètres (le taux de remplacement des multiples éléments ayant une durée de vie plus courte que le bâtiment par exemple), l'utilisation de nombreux matériaux et processus différents, le caractère unique de chaque bâtiment, la distance variable par rapport aux usines ou la variation des performances dans le temps (Buyle et al., 2013). Nous allons dans cette partie exposer les différentes sources d'imprécisions qui influencent le plus souvent les résultats des ACV à l'échelle du bâtiment.

Comme nous l'avons évoqué dans les limites de la méthode générale de l'ACV, le choix de l'unité fonctionnelle est primordial et conditionne toute la suite de l'étude et les possibilités de comparaison avec d'autres études. A l'échelle du bâtiment, ce choix est complexe. En effet, l'unité fonctionnelle choisie est souvent le bâtiment entier ou la surface nette habitable. Cependant, si l'on choisit le bâtiment complet, il est alors impossible de comparer notre étude avec une autre portant sur un bâtiment ayant une autre fonction par exemple. Cuéllar-Franca et Azapagic (2012) nous montrent qu'en fonction du choix de l'unité fonctionnelle, surface habitable ou nombre d'habitants, les résultats de l'étude peuvent être complètement contradictoires. Cette difficulté à définir une unité fonctionnelle est dû au fait que chaque bâtiment est spécifique, en fonction de son affectation, du climat dans lequel il évolue, des besoins de confort, de ces réglages de régulation thermique et autre. Ainsi, il est souvent difficile de comparer les différentes ACV faites à l'échelle du bâtiment (Lotteau et al., 2015a).

Outre la définition de l'unité fonctionnelle, la durée de vie du bâtiment considérée influe également fortement sur les résultats finaux. Si l'on considère habituellement une durée de vie de 50 à 60ans, il ne faut pas omettre d'appliquer un facteur correctif lors de la comparaison de différentes études portant sur des bâtiments aux durées de vie différentes (Servaes et al., 2013).

Certaines hypothèses diffèrent suivant les études concernant la phase d'utilisation. Dans la plupart des cas, le remplacement de certains composant du bâtiment est pris en compte, à la fin de leur durée de vie théorique. On considère qu'ils sont remplacés par

des composant identiques. Cependant, en réalité, fort est à parier qu'ils seront remplacés par des technologies plus avancées et donc avec de meilleures performances. De plus, au cours de la vie du bâtiment, de plus radicales interventions de rénovation vont être menées pour suivre la demande croissante de confort. Ces faits influencent les résultats portants sur la phase d'utilisation, ils vont notamment augmenter les performances du bâtiment et ainsi réduire les besoins énergétiques. Ainsi ils devraient être pris en compte dans l'ACV (Buyle et al., 2013 ; Erlandsson et Levin, 2005). Cette évolutivité peut être incluse dans les ACV en considérant différents scénarios.

Au niveau des indicateurs, comme nous l'avons évoqué précédemment, certains manquent de standardisation. C'est le cas de la consommation de sol. Cet impact se révèle déterminant dans les études qui l'intègrent, notamment lorsqu'une grande quantité de bois est utilisée. Or cet impact déterminant ne figure pas dans les normes et standards européens. La méthode qui semble intéressante à adopter est de suivre les standards, puis de les compléter d'autres indicateurs, en présentant les deux résultats (Buyle et al. 2013).

Comme nous l'avons également mentionné, la base de données utilisée peut avoir des impacts significatifs sur les résultats, notamment concernant les informations liées aux transports. Les distances entre l'usine, le revendeur et le chantier peuvent s'avérer impactantes d'autant plus s'il s'agit d'éléments lourds et volumineux (béton) (Servaes et al., 2013). Dans l'analyse de l'énergie grise, la variabilité des données se fait également particulièrement ressentir, et couplée aux variabilités régionales, les résultats peuvent être fortement impactés (Blengini, 2009). C'est particulièrement le cas lors de l'analyse de bâtiments en structure métallique. La manière dont est évalué le recyclage en fin de vie des éléments métallique et le pourcentage de métal recycle dans les éléments utilisés à une influence très forte sur l'analyse de l'énergie grise (Rossi et al., 2011).

Concernant les spécificités régionales, la localisation des différentes études ne facilite pas les comparaisons. Le climat local, les exigences de confort, les normes nationales, le comportement des habitants sont des paramètres qui diffèrent d'une étude. Cependant, le choix d'une unité fonctionnelle par mètre carré utile ou par personne améliore fortement la comparabilité des études (Buyle et al., 2013).

Le comportement des habitant est un facteur particulièrement difficile à prévoir qui influence les consommations énergétiques et donc les résultats d'une ACV, peu importe la qualité de celle-ci. De nombreuses recherches prouvent que les améliorations dans l'efficacité énergétique des bâtiments n'apportent pas autant d'économies d'énergie que prévu. En effet, si un bâtiment est isolé, les occupants ont tendance à augmenter la température de chauffage car cela ne provoquera qu'une faible hausse du coût. Ce phénomène psychologique appelé effet rebond n'est pas pris en compte dans les bilans environnementaux (Greening et al., 2000 ; Buyle et al., 2013).

Enfin, il serait intéressant de voir incorporées plus de données spécifiques au bâtiment étudié dans les ACV. Des données telles que le taux de remplacement réel des systèmes, la qualité de la construction, permettraient d'avoir une image plus précise des impacts de la maintenance. Ces données sont souvent prises comme des hypothèses conventionnelles (Buyle et al., 2013). En effet, actuellement l'ACV est souvent pratiquée en s'appuyant sur des bases de données, des études et différentes hypothèses mais sans réelles mesures sur les bâtiments considérés.

Les ACV sont principalement menées de manière rétroactives, il serait également intéressant que la méthode soit utilisée dans les phases de conception, comme un outil d'aide à la décision (Rossi et al., 2011). Cependant le manque d'outils adaptés et la lourdeur de la démarche se font sentir.

2.4.3. Principaux résultats issus de l'état de l'art

Nous allons ici collecter les résultats principaux recueillis dans les différents articles scientifiques étudiés afin de dresser un état de l'art en matière d'ACV à l'échelle du bâtiment. Ces informations pourront nous être utiles dans notre étude à l'échelle du quartier afin de dégager des tendances et d'identifier les domaines et paramètres déjà bien approfondis par la communauté scientifique internationale.

Même si l'ACV possède quelques limitations en tant qu'outil analytique, elle répond à un certain besoin. En effet, dans les années 2010, la phase d'occupation génèrait 90% des impacts environnementaux d'une construction, principalement du fait du chauffage et de la climatisation. Du fait des exigences normatives, les nouveaux bâtiments consomment de moins en moins d'énergie. Cette tendance renforce l'importance des autres phases du cycle de vie dans le bilan environnemental : choix des matériaux, mode de construction, utilisation d'eau. Ainsi, ces sujets nécessitent de plus en plus d'attention (Buyle et al., 2013). Soyons cependant attentifs au fait que de tels résultats concernant la proportion en termes d'impacts de chaque phase du cycle de vie sont fortement dépendants de la durée de l'étude. Historiquement, la majorité des études à l'échelle du bâtiment sont faites sur 50ans, cependant, l'Union Européenne préconise maintenant dans ses normes une durée de 30ans, ce qui peut augmenter fortement l'importance de la phase de construction par comparaison aux études faites sur 50 ou 80ans.

Cette dominance de la phase d'utilisation est une caractéristique générale revenant dans toutes les ACV à l'échelle du bâtiment, que ce soit en climat nordique ou méditerranéen. D'où la nécessité de réduire les besoins de chauffage et de refroidissement en améliorant l'isolation, l'étanchéité à l'air et en contrôlant la ventilation (Buyle et al., 2013).

Les aspects mis en avant dans le paragraphe précédent sont généralement pris en compte dans la conception et la construction de bâtiments à faible consommation ce qui permet de fortes réductions des consommations énergétiques (Buyle et al., 2013). Cependant, si l'on s'intéresse à certaines études portées sur des bâtiments à faible consommations telles que celle de Blengini et Di Carlo (2009), on remarque que le poids des différentes phases est remanié. En effet, même si les consommations énergétiques du bâtiment étudié sont dix fois inférieures à celle de la maison standard de référence, l'impact environnemental total est seulement divisé par 2. Ainsi, quand la demande énergétique diminue, les autres phases du cycle de vie voient leur impact relatif croître de manière importante. Dans cette étude, les impacts environnementaux de la phase de production dépassent ceux de la phase d'utilisation. Le poids du mode constructif ou du choix des matériaux devient crucial (Buyle et al., 2013). Huberman (2008) arrive aux mêmes conclusions, quand les consommations énergétiques de la phase d'utilisation diminuent, la part relative de l'énergie grise (matériaux) augmente, jusqu'à parfois dépasser la phase d'utilisation en termes d'impacts environnementaux. Afin de limiter cette forte influence de l'énergie grise dans le bilan environnemental des bâtiments à faible consommation, il est conseillé dans la littérature d'avoir recours à des structures légères et efficaces afin de minimiser la consommation de matériel, d'utiliser des matériaux recyclés ou réutilisés et de préférer des matériaux locaux à faible énergie grise (Rossi et al., 2011). Ce remaniement des phases augmente l'importance du choix des matériaux dans le bilan global mais également l'importance de l'utilisation des autres ressources telles que l'eau. Allacker (2010), nous apprend que la consommation d'eau devient un enjeu majeur dans le contexte des constructions nouvelles. Nous la prendrons donc en compte dans notre étude.

Concernant les matériaux de construction, une conclusion fréquente est le fait que le transport des matériaux durant la phase de construction influence très peu le bilan environnemental global. En effet, les matériaux sont souvent produits localement. Même quand ceux-ci sont transportés sur une longue distance, leur impact n'est pas majeur (Buyle et al. 2013). Plusieurs études montrent les bénéfices environnementaux de la réutilisation des matériaux en fin de vie, qui seraient supérieurs aux bénéfices du recyclage. Cependant, elles émettent quelques réserves sur la faisabilité à grande échelle d'une telle réutilisation, du fait que cela nécessiterait de grands changements dans les pratiques courantes (Thormark, 2009 ; Blengini, 2006 ; Buyle et al., 2013). En termes de choix structuraux, l'utilisation d'une structure bois est préférable dans le contexte de constructions à faible consommations. Elle provoque notamment beaucoup moins d'émissions de gaz à effet de serre sur son cycle de vie complet (Börjesson et Gustavsson, 2000), de nombreuses études le montrent. En effet, le bois est plus simple à manipuler et presque neutre en CO_2 alors que la production de métal ou de béton induit de forts impacts environnementaux notamment un énergie grise importante (Cole et Kerman, 1996 ; Gerilla et al., 2007, Buyle et al., 2013).

Erlandsson et Levin (2005), nous apprennent que la rénovation est généralement plus éco-responsable mais que les normes d'urbanisme ne permettent souvent pas d'adopter les mesures optimales. Quand il s'agit d'interventions sur l'enveloppe extérieure du bâtiment, pour un ajout d'isolation par exemple, les normes d'urbanismes sont très contraignantes. Cependant, le recours à la rénovation est en forte hausse en Belgique, avec une hausse des permis délivrés de 30% entre 1996 et 2010 (Buyle et al., 2013). Que ce soit en rénovation ou en construction neuve, nous savons que la qualité architecturale a une importance capitale (orientation, gains solaires, compacité). Cependant ce facteur est souvent rapidement écarté car trop dépendant du site et sujet aux réglementations urbaines. Certaines recommandations et lignes de conduite à ce sujet pourraient améliorer les performances environnementales des constructions (Buyle et al., 2013).

En fin, l'influence du mix énergétique sur les émissions de gaz à effet de serre est un sujet de recherche relativement récent, étudié principalement à l'échelle nationale dans la littérature. Les études montrent qu'une modification du mix énergétique en faveur des énergies renouvelables réduit significativement les émissions par personne à l'échelle nationale, même sans réduire les consommations (Hennicke, 2004 ; Marrero, 2010 ; Rossi et al., 2011). A l'échelle locale, la consommation d'énergie primaire durant la phase d'utilisation est fortement influencée par le système fournissant l'énergie (cogénération, pompe à chaleur, radiateurs électriques, etc.). Le choix du système a une plus grande influence sur la consommation d'énergie primaire que l'efficacité de l'enveloppe. Concernant les émissions de CO₂, elles dépendent fortement du carburant utilisé par le système (Gustavsson et Joelsson, 2010 ; Rossi et al., 2011). Rossi, Marique et Reiter (2011) nous confirment que le mix énergétique du pays dans lequel le bâtiment se situe influence fortement les émissions (équivalent CO₂) et ainsi que ce paramètre peut entièrement renverser les conclusions de l'analyse de l'empreinte carbone d'un bâtiment sur son cycle de vie complet. En effet, leur étude nous montre qu'une maison au Portugal ou en Belgique mettra moins de 50 ans pour voir l'équivalent carbone de la phase opérationnelle excéder celui de la phase de production des matériaux et de construction. Une maison équivalente en Suède mettra 87ans pour arriver au même résultat. Cela est dû au fait que la production d'électricité en Suède génère beaucoup moins d'émissions de CO₂.

2.5. Analyse du cycle de vie à l'échelle du quartier

Nous avons présenté la méthode de l'ACV appliquée à l'échelle du bâtiment, ses limites et les principaux résultats issus de ses applications. Nous allons maintenant élargir encore notre système et passer à l'échelle du quartier dans son ensemble.

Maintenant que de gros progrès ont été réalisés concernant les consommations énergétiques des nouvelles constructions, d'autres problématiques émergent. Nous avons souligné l'importance de s'intéresser aux phases autres que l'occupation, dont les impacts relatifs augmentent avec la diminution des consommations. Il est aussi nécessaire de s'attaquer à la rénovation thermique de manière plus sérieuse et les gouvernements proposent déjà des systèmes de primes.

Au-delà de l'échelle du bâtiment, les concepts de ville zéro-carbone, ville sans CO_2 ou ville post-carbone émergent un peu partout dans le monde. Les villes concentrent de plus en plus de population, elles accueillent aujourd'hui 50% de l'humanité. La ville de Paris, s'est engagée à réduire de 25% ses émissions de gaz à effet de serre entre 2007 et 2020 et d'atteindre à cette date 30% de ses consommations énergétiques issues de sources renouvelables. Mais l'énergie n'est pas le seul problème environnemental. Les villes prennent conscience de la nécessité de préserver la biodiversité et les espaces verts (Colobert et al., 2011).

Pour atteindre ces différents objectifs, de nouveaux outils et de nouvelles méthodes sont nécessaires pour être capable de mesurer à l'échelle urbaine les conséquences de choix architecturaux et urbains sur l'environnement (Colobert et al., 2011). De nombreuses méthodologies existent pour quantifier les impacts environnementaux à l'échelle de la ville mais selon Anderson et al. (2015), l'ACV est encore une fois la méthode dominante à l'échelle urbaine. En effet, après l'étude des différentes méthodes existantes, Loiseau et al. (2012) montrent que l'ACV fournit un cadre approprié et est la seule méthode permettant d'éviter de transvaser les charges environnementales d'une phase à l'autre du cycle de vie, d'un impact environnemental à l'autre ou bien d'un territoire à l'autre.

Il est clair que l'intérêt est croissant pour les analyses environnementales à l'échelle du quartier. C'est l'échelle opérationnelle typique du développement urbain et elle permet de jouer de levier pour une conception urbaine plus respectueuse de l'environnement. En effet, il y a un besoin actuel à l'échelle du quartier d'intégrer des réflexions sur la conception bioclimatique, les équipements partagés, la densité urbaine ou encore les questions de mobilité afin d'arriver à de meilleures performances environnementales. Par exemple, les décisions prises à l'échelle de l'îlot bâti telles que l'orientation, la compacité ou la densité influencent largement les consommations de chauffages (Lotteau et al.,

2015a). Olivier-Solà et al. (2011) affirment qu'il est fortement probable que les problématiques environnementales et énergétiques que nous traitons actuellement à l'échelle du bâtiment soient bientôt transférées à l'échelle urbaine.

Ainsi, les ACV à l'échelle du quartier commencent à entrer dans la pratique. Quelques travaux et publications concernant cette méthode ont été écrits mais ils restent rares et hétérogènes (Lotteau et al., 2015a). Certaines études menées par l'école des Mines ParisTech au sein du centre énergétique et procédés, visent à développer scientifiquement la méthode de l'ACV à l'échelle du quartier. Le but est même plus ambitieux car ces travaux visent à faire de la méthode un outil d'aide à la décision, dès la phase de conception (Colobert et al., 2011).

A cette nouvelle échelle, les relations entre la ville et le quartier doivent être étudiées. Il devient nécessaire de prendre en compte les réseaux, les transports, les déchets, les conditions climatiques ou encore le mix énergétique. Effectuer le bilan environnemental d'un quartier ne revient pas à faire la somme des bilans environnementaux des différents bâtiments de ce quartier. A l'images des différents éléments d'une construction qui entrent en interaction, les différents bâtiments d'un quartier s'influencent mutuellement. En fonction de la morphologie urbaine, l'un peu, par exemple, être un masque solaire pour l'autre, ou posséder une chaufferie va alimenter un réseau de chaleur mutualisé. D'autre part, les infrastructures de transport ou le réseau de voiries peuvent dépendre de la densité urbaine (Colobert et al., 2011).

Ainsi, le passage de l'échelle du bâtiment au quartier est un nouveau challenge et ouvre de nouvelles applications possibles pour la méthode de l'ACV, notamment dans les processus de prise de décision des collectivités territoriales.

2.5.1. Méthode

Le quartier est complexe, multifonctionnel, changeant. Sa durée de vie est longue. Ces aspects soulèvent de nombreuses problématiques nouvelles concernant la manière d'appliquer la méthode de l'ACV, notamment concernant la définition de l'unité fonctionnelle ou la considération des aspects temporels (Lotteau et al., 2015a). De plus, aucune norme ne dicte la marche à suivre à cette échelle. Ainsi, l'actuelle présentation de la méthode adaptée au quartier ne sera pas une exposition des normes comme dans les parties précédentes. Nous nous appuyons sur les normes générales ISO 14040 et 14044, sur les préconisations de l'ILCD Handbook et sur une revue de l'état de l'art actuel, pour déterminer les bonnes et mauvaises pratiques.

A l'échelle du quartier, l'ACV doit toujours suivre les quatre étapes préconisées par la norme ISO 14044, que nous avons détaillées dans le chapitre 2 et qui sont la définition du champ d'étude et des objectifs, l'inventaire, l'évaluation des impacts et l'interprétation des résultats. Pour chacune de ces étapes, des informations supplémentaires nécessaires sont à inclure dans le cas d'une étude à l'échelle du quartier.

2.5.1.1. Objectif et champ d'application

Concernant les objectifs, deux types d'études sont rencontrées dans la littérature. Certaines ont pour but de produire une connaissance spécifique sur un quartier particulier et d'autres ont pour but de produire des connaissances générales. Pour les études spécifiques, on trouve des études d'aide à la décision qui sont menées dans les premières phases du développement du projet. Leur but est d'analyser les impacts environnementaux du projet de manière à définir ses orientations majeures. A l'inverse, d'autres études sont menées en comparant différents scénarios ou différents quartiers réels de manière à prodiguer des conseils de bonnes pratiques sur la conception écologique. Les problématiques de densité urbaine et d'étalement urbain sont les principaux sujets abordés dans ces études et la majorité d'entre elles ne traite que l'énergie et les gaz à effets de serre (Lotteau et al., 2015a). Ainsi, une étude telle que la nôtre portant sur l'analyse de multiples scénarios grâce à plus de 10 indicateurs est réellement innovante.

Concernant le champ d'application, les diverses études diffèrent fortement. L'échelle du quartier n'est pas bien définie en termes de taille et l'on trouve des études portant sur des surfaces allant de 0.02 km² à 4.42 km². De même, des quartiers très différents sont étudiés. Certains sont uniquement résidentiels, comprenant logements individuels et collectifs, d'autres sont multifonctionnels. Leur densité va de 370 à 34400 habitants/km² et la quasi-totalité des études sont faites dans des pays développés (Lotteau et al., 2015a).

Le choix de l'unité fonctionnelle est également très hétérogène et celle-ci n'est souvent même pas clairement définie. Certaines études utilisent le quartier entier comme unité fonctionnelle comme par exemple Herfray et al. (2011) qui définissent : « un quartier avec 887 habitants, 734 employés de bureaux, 432 employés de magasins et 240 étudiants localisé près de Paris et considéré sur une durée de vie de 80 ans ». D'autres études utilisent une unité fonctionnelle par personne, par ménage, par m² du quartier étudié, m² d'espace habitable par habitant, m² de surface chauffée ou m² au sol d'espace construit (Lotteau et al., 2015a). Stephan et al. (2013), concluent que l'usage simultané d'unité fonctionnelle absolue, par personne et par unité de surface est très pertinente pour comprendre complètement les effets de densité urbaine. En effet, Norman et al. (2006), montrent qu'un quartier de faible densité urbaine consomme entre 2 et 2,5 fois plus d'énergie par personne qu'un quartier à forte densité mais seulement 1 à 1,5 fois plus par « unité d'espace habité ». Ainsi, utiliser des unités spatiales nous informe sur

l'intensité de la consommation de ressources et de l'impact du projet là où l'utilisation d'unité humaine permet des considérations sociales et d'efficacité d'utilisation des ressources (Lotteau et al., 2015a).

Enfin, concernant les frontières et les phases du cycle de vie étudiées, la question est également complexe. Popovici (2006) propose par exemple une définition du quartier selon trois éléments : les bâtiments, les espaces publics et les réseaux en considérant un cycle de vie du berceau à la tombe. La mobilité journalière des habitants peut être comprise dans la phase d'utilisation au même titre que la consommation d'énergie ou d'eau ou être vue comme un élément à part entière. Lotteau et al. (2015a), proposent une compartimentation en trois grandes étapes du cycle de vie du quartier. La phase de construction (extraction des matières premières, production, construction des bâtiments et infrastructures), la phase d'occupation (consommations opérationnelles et maintenance) et la phase de déconstruction (fin de vie). Pour chaque phase il convient de prendre en compte les contributions relatives aux bâtiments, aux espaces publics, aux réseaux et à la mobilité comme le montre la figure ci-dessous :

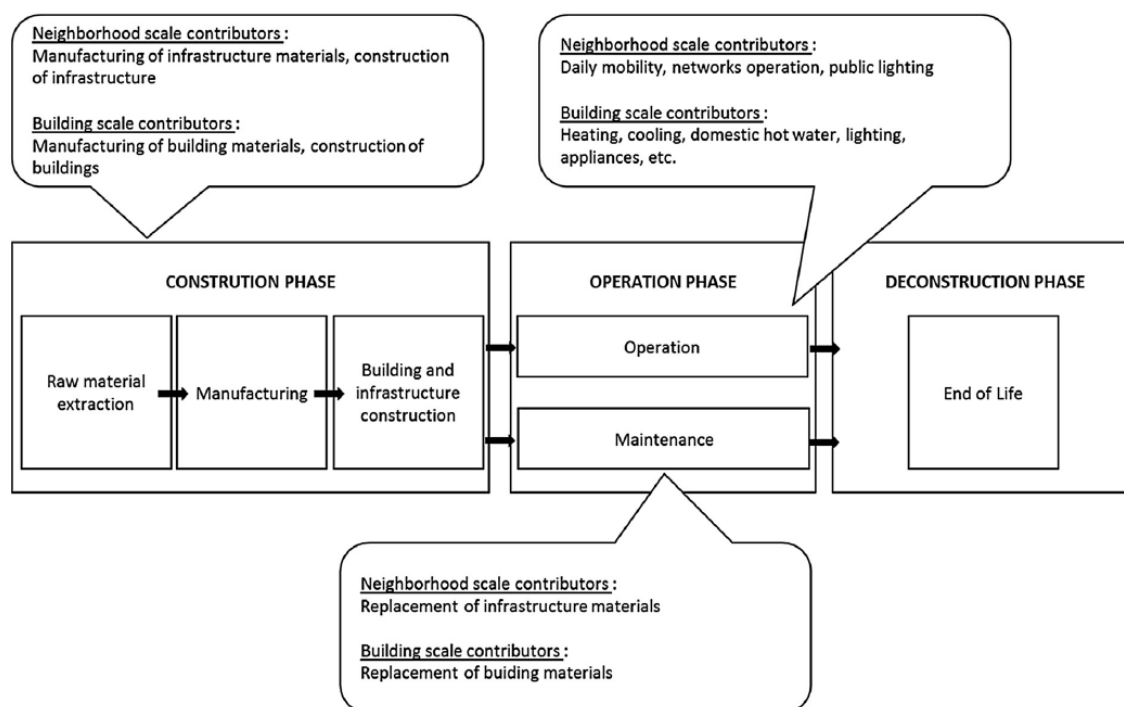


Figure 3: Etapes du cycle de vie du quartier et contributions associées à l'échelle du bâtiment et du quartier (Lotteau et al., 2015a)

Dans différentes études passées au crible, la définition des frontières du système est hétérogène car liée aux objectifs de l'étude. Toutes les études n'incluent pas la mobilité dans leur système voir même parfois pas les réseaux et ces éléments sont traités différemment (différents moyens de transports considérés, différents types de routes ou systèmes de traitement des déchets). Cette hétérogénéité dans la définition du système du quartier est encore accentuée par des différences dans le choix des contributions

allouées ou pas à chaque élément. Pour la phase d'utilisation par exemple, différentes consommations peuvent être allouées ou pas aux bâtiments (refroidissement, eau chaude domestique, utilisation d'eau, production de déchets). Cependant il y a des choix communs à de nombreuses études concernant les frontières. Par exemple, les réseaux sont toujours considérés comme des éléments passifs, dont seuls les matériaux de production sont pris en compte. Les consommations (eau, électricité, gaz) sont allouées aux bâtiments et aux espaces publics. Un autre point commun est que les consommations des ménages n'étant pas directement en relation avec le bâtiment ou la mobilité journalière (vêtements, nourriture, loisirs) ne sont pas prises en compte. En effet, elles sont considérées indépendantes du quartier où vit le ménage (Lotteau et al., 2015a).

Concernant les phases du cycle de vie considérées, toutes les études incluent la phase opérationnelle mais certaines ne prennent pas en compte la déconstruction. Les phases de construction et la phase opérationnelle sont parfois prises en compte de manières différentes. Norman et al. (2006), préfèrent ne pas prendre en compte la phase de construction et de maintenance des bâtiments et des infrastructures par manque de données et du fait de leur faible contribution relative considérant le cycle de vie complet, comme il a été prouvé dans des études antérieures. Certaines études ne se concentrent que sur l'énergie grise et ne considèrent alors pas la phase d'utilisation comme celle de Davila et Reinhart (2013). Concernant la mobilité, sa contribution est souvent considérée uniquement lors de la phase opérationnelle sauf dans certains rares cas où la production des véhicules est considérée (Lotteau et al., 2015a).

2.5.1.2. Inventaire du cycle de vie

Etudions maintenant la manière dont l'inventaire des flux entrants et sortants est réalisé. Nous différencions deux systèmes : le système de premier plan, qui inclut tous les processus sous le contrôle du preneur de décision et le système d'arrière-plan qui inclut les processus prenant part au système mais qui ne sont pas sous contrôle. Les processus de premier plan sont les consommations de matériaux de construction, d'eau et d'énergie, les nécessités de transport pour la mobilité journalière, les réseaux et espaces publics principalement. La taille des sites étudiés et leurs multiples spécificités rend difficile la collecte de données détaillées spécifiques au site (Lotteau et al., 2015a).

Pour les matériaux de construction, on utilise principalement des quantités issues d'une analyse des plans ou du master plan. Certains utilisent des bâtiments types dont les données sont disponibles comme Norman et al. (2006) ou Stephan et al. (2013). Pour les projets de plus petite taille une analyse des plans de chaque bâtiment peut être réalisée. Les quantités de matériaux relatives aux réseaux ou aux espaces publics sont aussi déterminées par analyse des plans. Cependant, aucune étude ne mentionne de données concernant les travaux de construction en eux-mêmes (Lotteau et al., 2015a).

Concernant les consommations énergétiques des bâtiments, deux types de données sont collectées. D'un côté, toutes les études considèrent les consommations liées au chauffage, au refroidissement et à la production d'eau chaude sanitaire et indiquent leurs sources. De l'autre, toutes les énergies autres (principalement basées sur l'électricité) ne sont pas tout le temps prises en compte. Les données relatives au chauffage sont obtenues via des études, des données nationales, ou via modélisation. Différents types de modélisations sont possibles. La majorité des études comme celle de Peuportier et al. (2006), Herfray et al. (2011) ou Colombert et al. (2011) utilisent des simulations thermiques des bâtiments. Ils utilisent d'ailleurs le même logiciel EQUER, qui repose sur une simulation thermique dynamique là où d'autres études se contentent de simulations basées sur des transferts de chaleur en statique comme Stephan et al. (2013) ou Trigaux et al. (2014). Une autre approche encore plus simple est de considérer les consommations du standard énergétique visé (Lotteau et al., 2015a).

Il existe également différents moyens de prendre en compte la mobilité. Norman et al. (2006) et Stephan et al. (2013) s'appuient sur des moyennes régionales. D'autres préfèrent des méthodes normatives plus complexes ou développent leur propre modèle statistique (Lotteau et al., 2015a).

Les procédés d'arrière-plan comme l'extraction des ressources, la production des produits de construction, d'eau ou d'électricité sont inventoriés via des bases de données. La base la plus utilisée est la base Ecoinvent, utilisée notamment dans le logiciel EQUER (Lotteau et al., 2015a).

2.5.1.3. Evaluation de l'impact

De nombreuses études se sont intéressées uniquement à l'énergie grise et/ou à l'indicateur GWP, cela même alors que l'ACV est une méthode d'analyse multicritères. Cependant, quelques autres, notamment celles utilisant le logiciel EQUER, analysent une série plus vaste d'indicateurs. Diverses méthodes de calculs sont utilisées telles que les méthodes CML-IA, Eco-Indicator 99, ou ReCiPe et ILCD étant plus récentes. En plus des indicateurs présentés précédemment et présents dans les normes européennes harmonisées, on retrouve des indicateurs supplémentaires comme la production de mauvaises odeurs, la santé humaine ou l'occupation du sol (Lotteau et al., 2015a).

2.5.2. Limites de la méthode

En étudiant les limites de l'ACV à l'échelle du quartier, nous nous rendons compte que les problématiques que nous avons soulevées à l'échelle du bâtiment se retrouvent amplifiées à l'échelle du quartier. Nous en discutons dans cette partie.

L'un des principales problématiques à l'échelle du quartier est encore une fois la comparabilité des études et le choix de l'unité fonctionnelle. Du fait de la diversité des études et de l'hétérogénéité dans la définition de l'unité fonctionnelle, du système, de ses frontières et des éléments pris en compte, il est difficile de comparer les différentes études ou de tirer des conclusions générales. En effet, il n'est pas possible à l'heure actuelle de définir une unique unité fonctionnelle permettant de comparer différents quartiers (Lotteau et al., 2015a). Herfray et al. (2011) concluent que la définition de l'unité fonctionnelle dépend du but de l'étude mais insistent sur le fait qu'il est nécessaire de mentionner la fonction du quartier, certaines quantités (m² d'habitation, de bureaux, de commerces, d'espaces publics, nombre d'habitants, etc.) et la durée de l'analyse. Une autre approche est, comme nous l'avons évoqué précédemment, d'avoir recours à plusieurs unités fonctionnelles complémentaires (spatiale, par personne et absolue) comme le font Norman et al. (2006), Stephan et al. (2013) et Nichols et Kockelman (2014).

La contextualisation des ACV à l'échelle du quartier est un autre challenge à relever qui permettrait de fournir des analyses plus utiles que ce soit pour la conception d'un quartier ou pour la politique urbaine. Le manque de considération de la situation et de l'environnement spécifique de chaque quartier n'est pas seulement une limite de l'ACV mais est reconnue comme une limite concernant toutes les méthodes existantes d'analyses environnementales (Perez et Rey, 2013). En effet, contrairement à un processus industriel et de la même manière qu'un bâtiment, un quartier est par nature un objet contextuel. Il est entouré d'un environnement spécifique, dans un climat spécifique et accueille des habitants aux comportements différents. Ainsi le besoin de contextualisation se fait ressentir à plusieurs niveaux de l'ACV. La contextualisation dans la phase d'inventaire nécessite le plus possible de données spécifiques au site. Le recours aux simulations thermiques permet une certaine contextualisation dans l'analyse des consommations énergétiques de la phase opérationnelle en prenant en compte le climat local (radiation solaire, vent, températures), les interactions entre les bâtiments et avec l'environnement (masques solaires et réflexions). Cela dit, ces simulations nécessitent beaucoup de temps et de données qui ne sont pas toujours disponibles dans les premières phases de développement d'un projet. D'un autre côté, utiliser des données statistiques permet d'effectuer des analyses très tôt mais ne permet pas un niveau de précision nécessaire pour être le support d'un processus de conception en termes d'efficacité énergétique. Il y a ainsi un réel besoin de développer des outils qui permettent la prise en compte du

contexte dans les premières phases de développement du projet. De même, il est nécessaire de travailler à régionaliser les méthodes de calcul des impacts environnementaux en fonction de la sensibilité des écosystèmes à tel ou tel phénomène (Lotteau et al., 2015a).

Enfin, concernant les aspects temporels, nous rencontrons toujours la problématique de la durée de vie considérée. Les quartiers sont construits sur une longue durée et comprennent à la fois des éléments aux longues durée de vie comme aux courtes, ce qui ne peut pas toujours être facilement prédit. Cela pose des problèmes pour la prise en compte de la maintenance, des rénovations et donc de l'évolution des performances des bâtiments. Il n'y a pas vraiment de consensus sur la durée de vie à considérer. Elle va de 50 à 100 ans dans la plupart des cas. Un autre aspect qui n'est pas pris en compte est l'aspect dynamique de différents facteurs tels que le mix énergétique par exemple. Cela peut avoir une importance considérable notamment pour les bâtiments à faibles consommations (Lotteau et al., 2015a).

Ainsi les limites de la méthode de l'ACV à l'échelle du quartier sont globalement identiques à celles évoquées à l'échelle du bâtiment ; à savoir les problèmes de comparaison, de reproductibilité, de définition de l'unité fonctionnelle, de contextualisation et d'aspects temporels.

2.5.3. Principaux résultats issus de l'état de l'art

Comme nous l'avons décrit précédemment, il est difficile d'agréger les résultats des différentes études en une conclusion générale du fait de l'hétérogénéité des manières adoptées pour mener l'ACV à une telle échelle. Cependant, nous pouvons lister les principaux résultats intéressants ressortant de ces études.

Stephan et al. (2013), démontrent que la consommation d'énergie durant la phase opérationnelle est la contribution principale aux impacts environnementaux sur le cycle de vie complet d'un quartier. En effet, elle compte pour près de 40% des consommations d'énergie primaire (PEC) ou pour plus de 42% des émissions de gaz à effet de serre (GHG). Cela n'est pas étonnant car c'est une remarque que nous avons déjà faite à l'échelle du bâtiment. Cependant, à l'échelle du quartier, la dominance de la phase d'utilisation apparaît moins prépondérante relativement aux autres phases. La seconde contribution, toujours selon la même étude est la mobilité. Elle est responsable de plus d'un tiers des PEC et des émissions de GHG. C'est l'énergie grise qui arrive en troisième position avec plus d'un quart des PEC et plus de 20% des émissions de GHG. Il est à noter que dans cette étude l'énergie grise des infrastructures de transports (routes) est comprise dans la mobilité. Ainsi l'étude souligne la forte contribution des routes dans l'énergie grise totale et la relative insignifiance des travaux de constructions avec seulement 1,3% de

contribution à l'énergie grise et 0.03% des consommations totales d'énergie sur le cycle de vie complet.

L'étude de Nichols et Kockelman (2014), portant sur l'analyse de quatre quartiers révèle un score de 53% des PEC provenant des constructions, 45,5% des PEC provenant de la mobilité (consommations opérationnelles et énergie grise des infrastructures) et seulement 1% provenant des autres infrastructures publiques (eau, eaux usées et éclairage).

En comparant plusieurs développements urbains de densités différentes, Norman et al. (2006), concluent que la mobilité contribue de manière bien plus significative à l'énergie totale consommée et aux émissions de GHG dans le cas d'un développement urbain de faible densité que dans le cas d'un développement dense. Ainsi, la part des impacts dus aux bâtiments est relativement plus grande dans le cas d'une forte densité. Les auteurs soulignent le fait que la production des matériaux de constructions est responsable de 10% de la consommation totale d'énergie et des rejets de GHG. Pour chacun des cas étudiés (haute et faible densité), les résultats sur une base par habitant montrent que la majorité des émissions de GHG est due à la mobilité et que la majorité des consommations d'énergie est due à la phase opérationnelle des constructions.

En comparant également quatre scénarios, basés sur différents types de bâtiments résidentiels, Trigaux et al. (2014), montrent que la contribution des infrastructures routières compte pour 1% à 6% des impacts totaux.

Lorsque l'on s'intéresse aux études portant sur des quartiers à faible consommations énergétiques, sans prendre en compte la mobilité, Herfray et al. (2011) et Herfray (2011), montrent respectivement qu'en termes de consommation d'énergie primaire, la phase de construction compte pour 7% et 13,5%, la phase opérationnelle pour 92% et 85% et la phase de déconstruction pour 1% et 1,5%. Nous constatons encore un fois la prédominance de la phase opérationnelle et la faible contribution des phases de construction et de déconstruction. Cependant, dans la première étude, un quartier à énergie positive est étudié et dans ce cas les résultats sont très différents. La phase de construction compte ici pour 41,5% des PEC, ce qui devient comparable avec la phase opérationnelle qui compte alors seulement pour 53,5%. Nous arrivons également aux conclusions formulées dans le cas de l'ACV à l'échelle du bâtiment à savoir l'augmentation relative de la contribution des phases autres que la phase opérationnelle dans le cas de bâtiments à très faible consommations.

Comme le montre Cherqui (2005), cette dominance de la contribution de la phase opérationnelle aux impacts environnementaux et la moindre importance de la phase de construction est vérifiée non seulement pour les consommations de PEC et les émissions de GHG mais également pour de nombreux autres indicateurs (11 sont étudiés au total).

Seul l'indicateur concernant la production de déchet est logiquement plus élevé en phase de déconstruction.

Peuportier et al. (2006), soulignent le fait que l'architecture influence également fortement les performances. A caractéristiques techniques identiques, les consommations simulées par le logiciel EQUER varient du simple au triple entre deux bâtiments issus du même quartier mais dans des îlots différents.

Ainsi, même si l'hétérogénéité des études ne permet pas de tirer des conclusions générales, des tendances peuvent être remarquées (Lotteau et al., 2015a) :

- Les bâtiments, suivis de la mobilité sont les premières sources d'émissions de GHG et les premiers consommateurs d'énergie primaire.
- La contribution aux consommations d'énergie primaire et aux émissions de GHG des bâtiments, de la mobilité et de l'énergie grise du quartier peuvent être du même ordre de grandeur.
- La phase opérationnelle est prédominante.
- La phase de production peut devenir aussi importante que la phase opérationnelle dans le cas de quartiers très économes en énergie.
- La phase de déconstruction est relativement insignifiante excepté pour la catégorie d'impact concernant la création de déchets.

Cette étude de l'ACV à l'échelle du quartier marque la fin de la partie consacrée à l'étude de l'état de l'art. Nous allons maintenant présenter la procédure que nous avons choisi d'adopter afin de réaliser notre étude.

Chapitre 3: Choix méthodologiques

Dans cette partie méthodologique, nous présenterons et justifierons nos choix concernant le quartier initial étudié, les hypothèses prises concernant l'ACV et l'outil d'analyse adopté.

Pour mener à bien notre étude, nous avons besoin d'un modèle initial, un quartier dont nous analyserons les impacts environnementaux grâce à la méthode de l'ACV et qui nous servira de base de comparaison. Nous effectuerons notre étude grâce à une suite logicielle spécialisée dans les analyses thermiques dynamiques et les ACV à l'échelle du bâtiment et du quartier. Ensuite, nous définirons plusieurs scénarios en faisant varier différents paramètres bien précis. Enfin, nous analyserons ces différents scénarios et les comparerons au modèle initial afin de dresser des conclusions.

3.1. Choix du quartier d'étude

Il nous a paru intéressant de nous baser sur un cas concret afin d'ancrer notre étude dans le réel. Ainsi, il nous est possible modéliser un quartier existant suivant ses plans précis et par la suite décliner tout une série de paramètres de manière virtuelle. Du fait de sa proximité avec le campus universitaire et de sa construction récente, l'écoquartier du Sart-Tilman semblait tout indiqué.

3.1.1. Site

L'écoquartier est situé sur le site du Sart-Tilman, au sud de Liège, en bordure d'Ardenne condruzienne. Il est implanté entre les rues de l'Aunaie, du Sart-Tilman et les Homes de l'université. Le site est fortement desservi par les transports en communs le reliant au centre de Liège, ceci en raison de la proximité de l'université. Cependant, peu de services sont accessibles à pied. Pour les habitants possédant une automobile, le centre de Liège se trouve à 15 minutes et la zone commerciale de Boncelles à 5 minutes.

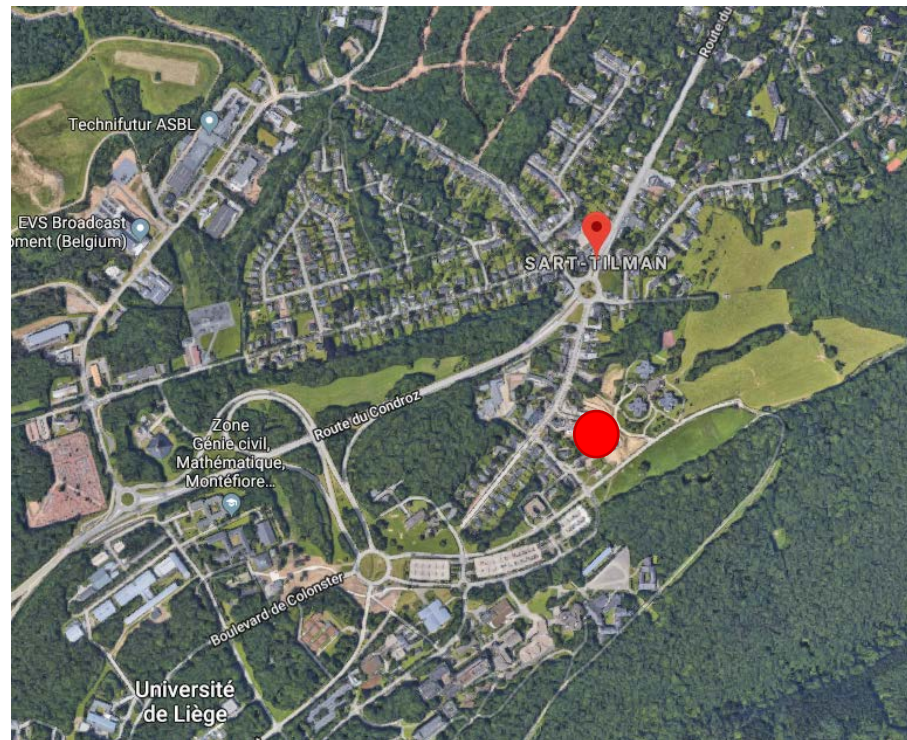


Figure 4 : Localisation du quartier d'étude



Figure 5 : Plan masse (source : <http://www.thomas-piron.eu/minisitesflash/angleur/projet.php#>)

3.1.2. Programme

Le quartier propose différentes typologies de bâtiments, des immeubles à appartements et des maison unifamiliales mitoyennes. Plusieurs fonctions sont également proposées. Une majorité de la surface construite est dédiée au logement mais nous retrouvons également des espaces dédiés à des fonctions commerciales ou aux professions libérales et petites entreprises. En tout, nous comptabilisons 40 petits appartements, 45 logements de tailles plus conséquentes, 11 maisons unifamiliales en duplex et 6 fonctions complémentaires (commerces et entreprises). Des espaces de parkings privatifs sont prévus à proximité des immeubles. Les logements en rez-de-chaussée possèdent un jardin privatif. Vous trouverez le plan masse du quartier et les plans du rez-de-chaussée de chaque bâtiment en annexe.

3.1.3. Conception durable

La volonté affichée par les concepteurs est de réaliser un quartier durable et respectueux de l'environnement. La majorité des bâtiments ont été conçus pour respecter les consommations énergétiques imposées par les standards passifs ou basse consommation. De plus, le quartier répond à la quasi-totalité des critères du référentiel quartier durable publié par l'université de Liège. Plus de 50% des logements sont mitoyens et le site affiche une densité de 40 logements/hectare.

Les espaces extérieurs ont été travaillés et aménagés avec plus de 30% de surfaces « vertes » ou « bleues » et une gestion des eaux séparative pour les eaux de pluies et eaux usées. Des noues et des citernes de récupération ont également été mises en œuvre.

3.2. Hypothèses concernant l'ACV

3.2.1. Objectifs et champ d'application

Comme nous l'avons précisé précédemment, notre étude vise à quantifier l'impact environnemental de différents choix architecturaux ou urbanistiques pris à l'échelle du quartier. Nous ne cherchons pas ici à produire des connaissances spécifiques à un cas précis mais bien à produire des connaissances générales, des conseils de bonne pratique concernant la conception écologique d'un nouveau quartier.

3.2.1.1. Unité fonctionnelle

Nous l'avons déjà largement évoqué durant notre état de l'art, le choix de l'unité fonctionnelle est crucial. Ici, nous choisissons de limiter notre étude à la partie résidentielle du quartier étudié. Nous calculerons systématiquement les impacts environnementaux de notre quartier suivant 3 unités fonctionnelles. Les résultats bruts correspondront à l'unité fonctionnelle « écoquartier résidentiel de 3.5ha comportant 1ha de voiries, allées et parkings, 17800m² d'espaces verts, 6580 m² de surface construite au sol, 13160 m² de plancher, hébergeant environ 220 personnes, étudié sur une durée de vie de 80 ans et situé à proximité de Liège en Belgique ». Ces résultats seront transformés pour répondre à deux unités fonctionnelles plus parlantes : le m² et l'habitant.

3.2.1.2. Frontières du système

Notre étude inclura l'analyse de l'impact des bâtiments, des réseaux, des espaces publics, de la mobilité et de la gestion des déchets. Ces éléments seront analysés depuis la phase de construction jusqu'à leur fin de vie (mise en décharge) en passant par la phase d'utilisation.

3.2.2. Choix des données

Les données environnementales que nous utiliserons sont issues de la base de données Ecoinvent développée par différents instituts de recherches basés en Suisse. Ces données comprennent, pour chaque procédé et matériau, un inventaire du cycle de vie qui contient l'ensemble des flux de matière et d'énergie entrant et sortant du système (Peuportier et al., 2006) :

- Ressources consommées (eau, énergie par exemple) ;
- Emissions dans les différents milieux naturels : air, eau ou sols (ammoniaque dans l'eau, métaux dans le sol, CO₂ dans l'air par exemple) ;
- Déchets créés (inertes, toxiques ou radioactifs).

Nous utiliserons la version 2.2 (2012) de la base Ecoinvent. L'élaboration de cette base de données suit des processus qui ont été plusieurs fois certifiés comme fiables et le contenu de cette base a été vérifié et validé par des experts internationaux. Le centre Ecoinvent est reconnu leader international sur les données d'écobilan et est reconnu pour la transparence de ces méthodes (ecoinvent.org).

3.2.3. Indicateurs environnementaux

Nous avons présenté en détails dans le chapitre 2 les différents impacts préconisés par les normes européennes harmonisés ainsi que d'autres indicateurs que nous jugeons intéressants. Voici maintenant la liste des impacts que nous avons choisi d'étudier dans notre étude. Ils sont au nombre de 17 et comprennent :

- L'effet de serre (via le GWP)
- L'acidification (via le PA)
- Demande cumulative d'énergie
- L'eau utilisée
- Déchets produits
- L'épuisement des ressources abiotiques (via l'ADP)
- L'eutrophisation (via le PE)
- La production d'ozone photochimique (via l'ODP)
- Les dommages à la biodiversité (via le PDF)
- Les déchets radioactifs
- Les dommages à la santé (via le DALYs)
- Les odeurs (via l'OTV)
- Le potentiel de dégradation lié à la transformation du sol
- Le pourcentage d'imperméabilisation
- Le potentiel de dégradation lié à la l'occupation du sol

3.3. Choix de l'outil d'analyse

C'est la suite de logiciels développés par le Centre Efficacité Energétique des Systèmes de l'école des Mines ParisTech que nous avons choisi d'utiliser. Elle comprend historiquement trois logiciels que sont ALCYONE, COMFIE-PLEIADES et novaEQUER. Nous allons présenter chacun des logiciels et décrire leur fonctionnement. Cette suite logicielle est utilisée par de nombreux laboratoires de recherches internationaux et a été clairement validée par la communauté scientifique.

La chaîne d'analyse est la suivante :

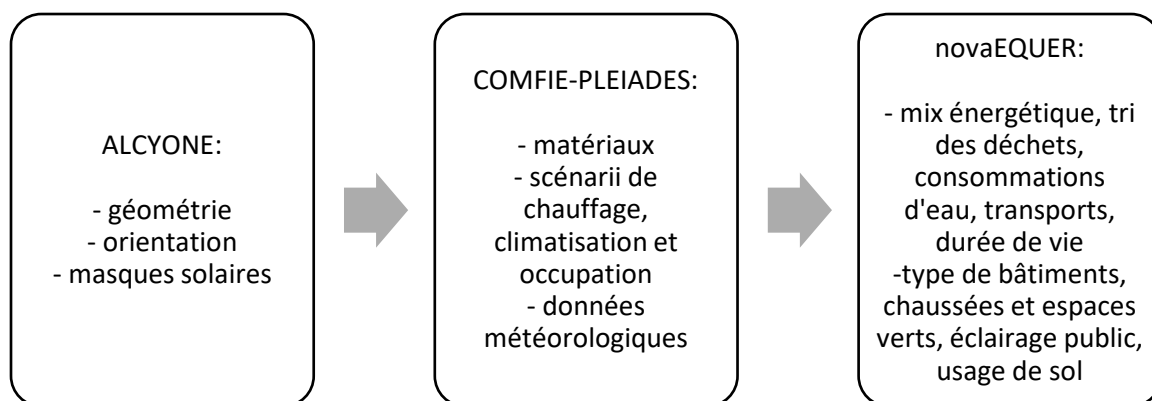


Figure 6: Chainage des logiciels d'analyse

ALCYONE est un outil de saisie graphique. Il permet de décrire la géométrie d'un bâtiment (Salomon et al., 2005), de représenter ses masques solaires et de définir la composition des parois. C'est également via ce logiciel que nous définissons le zonage du bâtiment où le comportement thermique est homogène (Colombert et al., 2011).

COMFIE-PLEIADES nous permet de réaliser une simulation thermique dynamique pour les bâtiments (Salomon et al., 2005). La géométrie créée via ALCYONE peut être importée à partir des informations saisies concernant les matériaux, les scénarii d'occupation et les données météorologiques, le logiciel évalue les besoins en chauffage et climatisation. Il est possible de désagréger les résultats par zone thermique ou par période de temps. Le moteur de calcul est le noyau COMFIE et l'interface graphique est PLEIADES (Colombert et al., 2011).

NovaEQUER est l'outil d'évaluation de la qualité environnementale. Les besoins calculés dans COMFIE sont exportés et des entrées supplémentaires sont fournies afin de réaliser l'ACV. On y retrouve des données telles que le mix énergétique, la mobilité des usagers, la constitution des espaces extérieurs et des réseaux par exemple. Le logiciel effectue alors l'ACV des bâtiments et du quartier et présente des résultats sous forme de radars compilant les différents impacts avec la possibilité de visualiser la part de chaque phase du cycle de vie et de comparer différentes variantes d'un même projet.

Dans les dernières versions de la suite logicielle ici présentée, les différents modules ont été agrégés en un seul logiciel nommé Pléiades ACV. Cela dit, leur fonctionnement reste identique.

3.4. Choix des scénarios étudiés

Suite à notre étude de l'état de l'art à de nombreuses discussions avec l'équipe de recherche, les membres du jury, les ingénieurs du bureau Ecorce et l'architecte du projet, nous avons choisi d'étudier l'impact des paramètres suivants :

- Orientation
- Gestion des eaux
- Mobilité
- Densité
- Installation solaire photovoltaïque

Chapitre 4: Modélisation du quartier et analyse thermique dynamique

Nous commençons la modélisation de notre quartier d'étude par la saisie des données caractéristiques du projet et la modélisation graphique des bâtiments du site. Nous allons ici saisir les paramètres géométriques des bâtiments, attribuer à chacune des parois ses propriétés thermiques et définir le zonage et les scénarios d'utilisations. Une fois tous les paramètres définis, nous serons en mesure de lancer les calculs de simulation thermique dynamique.

4.1. Caractéristiques du projet

4.1.1. Données générales de construction

La première étape de la modélisation est la saisie de différentes données de construction. Nous définissons premièrement les données par défaut concernant les parois, les menuiseries, les états de surface et les ponts thermiques de nos bâtiments. Il sera cependant ensuite possible de les modifier élément par élément si nécessaire.

4.1.1.1. Parois

Concernant les parois, nous indiquons les matériaux et éléments de construction, leurs épaisseurs, leurs caractéristiques mais également les éventuels ponts thermiques. Les différentes compositions de parois utilisées dans notre projet sont détaillées dans le tableau 15 ci-dessous. Vous y trouverez l'épaisseur (e), la masse surfacique, la conductivité thermique (λ) et la résistance thermique (R). Nous avons ici modélisé les parois réelles du projet avec leurs caractéristiques précises.

		e (cm)	$\rho \cdot e$ (kg/m ²)	λ (W/m.K)	R (m ² .K/W)
Mur extérieur enduit	Enduit extérieur	1,5	26	1,150	0,01
	Polystyrène expansé	32,0	8	0,032	10,00
	Bloc silico-calcaire	15,0	270	0,136	1,10
	Plafonnage	1,3	11	0,325	0,04
Mur extérieur bardé	Bardage fibres-ciment	2,0	36	0,950	0,02
	Lame d'air	1,2	0	0,080	0,15
	Polyuréthane	24,0	7	0,025	9,60
	Bloc silico-calcaire	15,0	27	0,136	1,10
	Plafonnage	1,3	11	0,325	0,04
Plancher Haut	Etanchéité PDM				
	Polyuréthane	40,0	12	0,025	16,00
	Hourdis béton	25,0	325	1,389	0,18
	Plafonnage	1,3	11	0,325	0,04
Plancher Intermédiaire	Chappe + revêtement	8,0	144	0,700	0,11
	Polyuréthane	1,0	0	0,030	0,33
	Béton cellulaire	8,0	48	0,210	0,38
	Hourdis béton	25,0	325	1,389	0,18
	Plafonnage	1,3	11	0,325	0,04
Plancher Bas	Chappe + revêtement	8,0	144	0,700	0,11
	Polyuréthane	25,0	8	0,025	10,00
	Dalle béton	25,0	575	1,750	0,14
Paroi Interne	Plafonnage	1,3	11	0,325	0,04
	Bloc silico-calcaire	15,0	270	0,136	1,10
	Polystyrène expansé	4,0	1	0,032	1,25
	Bloc silico-calcaire	15,0	270	0,136	1,10
	Plafonnage	1,3	11	0,325	0,04

Tableau 15 : Composition des parois

Il est aussi nécessaire de renseigner les états de surface des différentes parois afin de gérer le comportement vis-à-vis des rayonnements. Nous utilisons les valeurs standards fournies par le logiciel correspondant aux revêtements utilisés. Vous trouverez dans le tableau 16 ci-dessous les valeurs d'émissivité (ϵ), d'absorptivité (α) et de réflectivité (ρ) des différents revêtements utilisés :

Localisation	Revêtement	Propriétés		
		ϵ	α	ρ
Face externe	Brique rouge	0,92	0,68	20%
Plancher	Béton	0,88	0,9	30%
Toiture externe	Gravier gris	0,95	0,85	15%
Face interne	Peinture blanche	0,91	0,2	80%
Plafond	Peinture blanche	0,91	0,2	80%

Tableau 16 : Etats de surfaces des parois

4.1.1.2. Menuiseries

Concernant la composition des portes et fenêtres nous utilisons également les valeurs standards fournies par le logiciel. Il s'agit de fenêtres double-vitrage peu émissives et de portes isolantes compatibles avec les standards de basse consommation. Vous trouverez dans le tableau 17 ci-dessous les caractéristiques comprenant les transmissions thermiques du cadre et du vitrage (U_{cadre} et $U_{vitrage}$), les facteurs solaires (Sw) et les facteurs de transmission lumineuse (TI) :

	U_{cadre} (W/m ² .K)	$U_{vitrage}$ (W/m ² .K)	Sw	TI
Double vitrage peu émissif	2,1	1,695	0,549	0,68
Porte isolante	1		0,04	

Tableau 17 : Caractéristiques des menuiseries

4.1.1.3. Ponts thermiques

Les ponts thermiques sont rares dans les constructions étudiées. En effet, s'agissant principalement de bâtiments passifs, la résolution des nœuds constructif a été particulièrement soignée. Cependant, il subsiste quelques faibles pertes inévitables. Nous indiquons les valeurs des déperditions thermiques linéiques (ψ) dans le tableau ci-dessous :

	Ψ (ψ) (W/m ² .K)
Appui de fenêtres	0,15
Seuil de porte	0,15
Plancher bas	0,2
Angle sortant	0,08
Angle entrant	0,03

Tableau 18 : Pont thermiques

4.1.1.4. Données Météorologiques

Les données météorologiques sont cruciales car elles vont nous permettre de prendre en compte les apports solaires et autres caractéristiques du site. Dans notre cas, la station la plus proche est celle de Bruxelles (Uccle).

Cependant, les données concernant cette station ne sont pas incluses de base dans le logiciel. Nous devons alors créer une nouvelle station météo. Un module nommé « météoalc » intégré au logiciel Pléiades permet de réaliser cette opération. Il va nous permettre d'importer ou de générer des fichiers météo. Nous importons alors un fichier depuis le site energyplus.net que nous convertissons pour pouvoir l'utiliser dans Pleiades. Nous avons ainsi nos données météo localisées qui comprennent : les températures horaires, les rayonnements globaux et diffus horizontaux horaire (calcul des besoins de chauffage), le rayonnement direct (calcul solaire thermique), l'humidité relative, la température de l'eau froide (calcul d'eau chaude sanitaire) et le vent (calcul aérodynamique). Il nous reste à renseigner l'altitude du site de l'écoquartier qui est d'environ 235m, cette donnée permet au logiciel de corriger les températures (-0.6°C tous les 100m) par rapport à l'altitude de la station météo (58m) et les coordonnées géographiques du projet. Celles-ci permettent de générer le diagramme solaire. Nous indiquons également les données concernant le vent (sa direction et sa vitesse) en termes de moyennes annuelles.

4.2. Modélisation 3D

Une fois ces quelques données renseignées, il est maintenant temps de modéliser notre quartier en trois dimensions. Pour cela, nous nous basons sur les plans et les documents complémentaires fournis par l'architecte du projet. Nous modélisons donc les parois, planchers, dalles, toitures, ouvertures et masques solaires. Les géométries des bâtiments et des ouvertures réelles ont été scrupuleusement respectées.

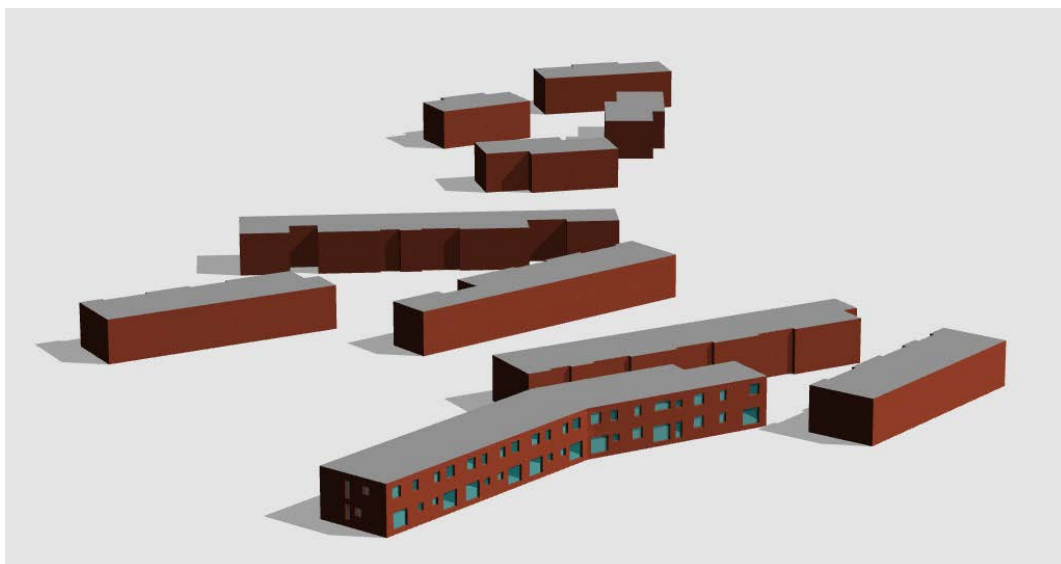


Figure 7 : Vue du modèle 3D du quartier tel que présenté dans le logiciel Pléiades (les ouvertures n'apparaissent que sur le bâtiment sélectionné)

Toute l'utilité d'une telle modélisation du quartier en trois dimensions est de prendre en compte l'orientation et les masques solaires que réalisent les différents bâtiments les uns sur les autres. Nous pourrions ainsi étudier l'impact d'un changement d'orientation du plan masse ou de l'augmentation de la hauteur de certains bâtiments.

4.3. Zonage Thermique

Suite à cette modélisation, nous définissons les zones thermiques et leurs scénarios d'occupation afin de pouvoir mener à bien notre simulation thermique dynamique. Nous avons créé trois types de zones thermiques. Par soucis de simplicité et du fait de l'échelle d'étude, nous n'avons pas détaillées les zones thermiques pièce par pièce pour chaque appartement. Nous avons séparé les appartements en deux zones : une zone jour et une zone nuit. En plus de cela, nous avons créé une zone correspondant aux halls. Passons en détails les paramètres définis.

4.3.1. Températures de consigne de chauffage

- Zone jour : 16°C entre 22h et 7h et 19°C en journée.

	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi	dimanche
0h	15	15	15	15	15	15	15
1h	15	15	15	15	15	15	15
2h	15	15	15	15	15	15	15
3h	15	15	15	15	15	15	15
4h	15	15	15	15	15	15	15
5h	15	15	15	15	15	15	15
6h	15	15	15	15	15	15	15
7h	15	15	15	15	15	15	15
8h	19	19	19	19	19	19	19
9h	19	19	19	19	19	19	19
10h	17	17	17	17	17	19	19
11h	17	17	17	17	17	19	19
12h	17	17	17	17	17	19	19
13h	17	17	17	17	17	19	19
14h	17	17	19	17	17	19	19
15h	17	17	19	17	17	19	19
16h	17	17	19	17	17	19	19
17h	17	17	19	17	17	19	19
18h	19	19	19	19	19	19	19
19h	19	19	19	19	19	19	19
20h	19	19	19	19	19	19	19
21h	19	19	19	19	19	19	19
22h	15	15	15	15	15	15	15
23h	15	15	15	15	15	15	15

Tableau 19 : Température de consigne des zones thermiques hébergeant les pièces de vie (°C)

- Zone nuit : 18°C entre 22h et 7h et 16°C en journée.

	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi	dimanche
0h	18	18	18	18	18	18	18
1h	18	18	18	18	18	18	18
2h	18	18	18	18	18	18	18
3h	18	18	18	18	18	18	18
4h	18	18	18	18	18	18	18
5h	18	18	18	18	18	18	18
6h	18	18	18	18	18	18	18
7h	16	16	16	16	16	16	16
8h	16	16	16	16	16	16	16
9h	16	16	16	16	16	16	16
10h	16	16	16	16	16	16	16
11h	16	16	16	16	16	16	16
12h	16	16	16	16	16	16	16
13h	16	16	16	16	16	16	16
14h	16	16	16	16	16	16	16
15h	16	16	16	16	16	16	16
16h	16	16	16	16	16	16	16
17h	16	16	16	16	16	16	16
18h	16	16	16	16	16	16	16
19h	16	16	16	16	16	16	16
20h	16	16	16	16	16	16	16
21h	16	16	16	16	16	16	16
22h	18	18	18	18	18	18	18
23h	18	18	18	18	18	18	18

Tableau 20 : Températures de consigne des zones thermiques hébergeant les pièces de nuit (°C)

Nous supposons la zone jour occupée en journée et inoccupée la nuit et inversement pour la zone nuit. Nous jugeons une température de 18°C suffisante pour les chambres en cas de sommeil.

4.3.2. Puissances dissipées (W/m^2)

	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi	dimanche
0h	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
1h	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
2h	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
3h	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
4h	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
5h	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
6h	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
7h	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
8h	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
9h	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
10h	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
11h	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
12h	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
13h	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
14h	1,14	1,14	5,7	1,14	1,14	1,14	1,14
15h	1,14	1,14	5,7	1,14	1,14	1,14	1,14
16h	1,14	1,14	5,7	1,14	1,14	1,14	1,14
17h	1,14	1,14	5,7	1,14	1,14	1,14	1,14
18h	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
19h	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
20h	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
21h	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
22h	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
23h	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14

Tableau 21 : Puissances dissipées à l'intérieur du bâtiment (W/m^2)

Les puissances dissipées à l'intérieur du bâtiment sont dues principalement à l'utilisation de matériel électrique dégageant de la chaleur. Leurs valeurs sont majorées pendant les périodes de la journée durant lesquelles les activités des occupants sollicitant des appareils électriques sont supposées plus importantes.

4.3.3. Pourcentage d'occupation

Nous fixons l'occupation de nos appartements à 0.033 habitants/ m^2 . Ce qui correspond à un occupant pour 30 m^2 . Les taux d'occupation en pourcentage sont indiqués dans les tableaux 22 et 23 ci-dessous.

■ Zone jour :

	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi	dimanche
0h	0	0	0	0	0	0	0
1h	0	0	0	0	0	0	0
2h	0	0	0	0	0	0	0
3h	0	0	0	0	0	0	0
4h	0	0	0	0	0	0	0
5h	0	0	0	0	0	0	0
6h	0	0	0	0	0	0	0
7h	50	50	50	50	50	0	0
8h	100	100	100	100	100	50	50
9h	100	100	100	100	100	100	100
10h	100	100	100	100	100	100	100
11h	0	0	50	0	0	100	100
12h	0	0	50	0	0	100	100
13h	0	0	50	0	0	100	100
14h	0	0	50	0	0	100	100
15h	0	0	50	0	0	100	100
16h	0	0	50	0	0	100	100
17h	0	0	50	0	0	100	100
18h	100	100	100	100	100	100	100
19h	100	100	100	100	100	100	100
20h	100	100	100	100	100	100	100
21h	100	100	100	100	100	100	100
22h	100	100	100	100	100	100	100
23h	0	0	0	0	0	50	50

Tableau 22 : Pourcentage d'occupation des pièces de vie (% d'occupants)

■ Zone nuit :

	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi	dimanche
0h	100	100	100	100	100	100	100
1h	100	100	100	100	100	100	100
2h	100	100	100	100	100	100	100
3h	100	100	100	100	100	100	100
4h	100	100	100	100	100	100	100
5h	100	100	100	100	100	100	100
6h	100	100	100	100	100	100	100
7h	50	50	50	50	50	50	50
8h	0	0	0	0	0	0	0
9h	0	0	0	0	0	0	0
10h	0	0	0	0	0	0	0
11h	0	0	0	0	0	0	0
12h	0	0	0	0	0	0	0
13h	0	0	0	0	0	0	0
14h	0	0	0	0	0	0	0
15h	0	0	0	0	0	0	0
16h	0	0	0	0	0	0	0
17h	0	0	0	0	0	0	0
18h	0	0	0	0	0	0	0
19h	0	0	0	0	0	0	0
20h	0	0	0	0	0	0	0
21h	50	50	50	50	50	50	50
22h	100	100	100	100	100	100	100
23h	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 23 : Pourcentage d'occupation de la zone nuit (% d'occupants)

4.3.4. Ventilation

Pour chaque zone thermique, nous définissons les paramètres de ventilation. Nous considérons une bonne étanchéité à l'air se traduisant par une infiltration de 0.25 Vol/h à travers la paroi. Les normes thermiques limitent à 0.6 Vol/h les infiltration d'air pour les bâtiments neufs, cependant, étant ici dans le cas de bâtiments passifs, nous supposons une étanchéité à l'air ayant fait l'objet d'une minutie particulière lors de l'étude et de la mise en œuvre. Un scénario annuel de ventilation standard est choisi avec un débit nominal de 0.3 vol/h, une ventilation mécanique contrôlée double flux et un échangeur thermique dont le rendement est de 85%. Cet échangeur est by-passé entre mi-juin et début septembre.

4.3.5. Chauffage

La génération d'eau chaude pour le système de chauffage comme pour l'ECS est assurée par une chaudière gaz à condensation standard, au rendement PCI de 92%. L'émetteur de chaleur est constitué d'un plancher chauffant au rez-de-chaussée et de radiateurs au premier étage. Concernant les caractéristiques de ces systèmes, nous conservons les données standards présentes par défaut dans le logiciel.

Maintenant que toutes les données et caractéristiques nécessaires à la réalisation de notre simulation thermique ont été renseignées, nous pouvons lancer le calcul.

4.4. Résultats de la simulation thermique dynamique

La principale exigence pour respecter les standards passifs est d'avoir un besoin de chauffage inférieur à 15 kWh/m².an. Si nous faisons la moyenne sur tous les bâtiments de notre quartier, nous obtenons un besoin de chauffage de 15,4 kWh/m².an. Le tableau 24 compile les besoins de chauffage des différents bâtiments :

Bâtiments	Besoins de chauffage kWh/m ² .an
A3	15
B2	13
B3	13
D1	20
D2	20
D3	19
D4	17
C1	12
C2	13
C3	12
Moyenne	15,4

Tableau 24 : Besoins de chauffage respectifs des différents bâtiments du quartier

Nous remarquons que certains bâtiments, les moins bien orientés, ne respectent pas le standard passif, tandis que d'autres le surpassent. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par les ingénieurs du bureau d'étude Ecorce.

Vous trouverez le rapport complet de la STD du bâtiment A3 en annexe.

Chapitre 5: Analyse du cycle de vie – Scénario initial

Pour mener à bien notre ACV, nous utilisons le logiciel Pléiades ACV présenté précédemment.

5.1. Données générales relatives au projet

5.1.1. A l'échelle du bâtiment

Plusieurs données d'origine des bâtiments sont récupérées des résultats de simulation thermique dynamique telles que :

- Les métrés de tous les éléments de construction et leurs caractéristiques détaillées.
- Les besoins et consommations d'énergies et d'eau issues de la simulation thermique dynamique.

Il reste cependant certaines données complémentaires à renseigner.

5.1.1.1. Données complémentaires concernant les matériaux

Premièrement, nous devons attribuer à chaque matériau et équipement de notre projet les données correspondant à leurs impacts environnementaux dans la base de données Ecoinvent v2.2 contextualisée pour la France. Du fait de l'absence de données précises concernant le traitement spécifique en fin de vie de chacun des matériaux utilisés, nous les considérons tous comme déchets inertes mis en décharge.

Concernant la durée de vie des différents éléments, nous nous basons sur une trentaine d'années pour les menuiseries, une dizaine d'année pour les revêtements et une vingtaine d'années pour les équipements spécifiques. Les matériaux structuraux et isolants ont une durée de vie supposée égale à celle du bâtiment, c'est-à-dire de 80 ans. Ces durées de vies permettent de calculer les impacts de la phase de rénovation.

Les distances de transport des matériaux que nous prenons en compte dans l'ACV sont contextualisées au cas de la Belgique et sont les suivantes (Servaes et al., 2013) :

- 100 km entre le site de production et le chantier.
- 50 km entre le site et la décharge concernant la fin de vie.

De plus, un surplus de matériaux utilisés sur chantier de 5% est considéré. Il correspond au taux de chute moyen des différents produits de construction.

5.1.1.2. Données énergétiques

Afin de déterminer le plus justement possible l'impact des consommations électriques, nous renseignons le mix énergétique belge dans le logiciel. Il est le suivant : 52% d'énergie nucléaire, 27% de gaz naturel, 17% de sources renouvelables et 4% de charbon (GIEC, 2016).

Concernant les consommations liées au chauffage et à l'ECS, elles sont calculées via les besoins issus de la STD. Le système de production est, nous le rappelons, une chaudière à condensation fonctionnant au gaz naturel dont le rendement PCI est de 92%.

5.1.1.3. Eau

Concernant les consommations d'eau, nous effectuons une description des équipements inclus dans les appartements et de leur utilisation afin d'effectuer une simulation précise des consommations. Nous incluons les équipements suivants :

- Lave-linge
 - Capacité : 60 l
 - Utilisation : 1/semaine/logement
- Lave-vaisselle
 - Capacité : 13 l
 - Utilisation : 2/semaine/logement
- Evier
 - Utilisation : 2min/j/personne
 - Débit : 5l/min
- Lavabo
 - Utilisation : 2x2min/j/personne
 - Débit : 5l/min
- Douche
 - Utilisation : 7min/jour/personne
 - Débit : 7l/min

- Chasse d'eau
 - Utilisation : 4/j/personne
 - Capacité : Double flux 6l/3l

De plus, nous considérons : que l'installation est équipée d'un réducteur de pression, que la longueur moyenne de distribution est inférieure à 8m, 15% de pertes dans le réseau et qu'aucun usage d'eau potable n'est fait pour le nettoyage et l'arrosage extérieur. Dans notre scénario de base, nous n'incluons pas les systèmes de récupération d'eau de pluie présents dans le quartier réel, ceci pour en mesurer l'impact dans une étude ultérieure.

Au total, ces options nous amènent à une consommation de 100l d'eau par personne et par jour dont 50% d'ECS. A titre de validation de nos résultats, nous consultons les consommations moyennes belges qui sont de 110 litres d'eau par personne et par jour dont 40% d'ECS. Les résultats sont concordants avec une utilisation légèrement plus importante d'ECS dans notre cas.

5.1.1.4. Déchets

La politique de tri sélectif des déchets est également prise en compte (Moinsdedechets.wallonie.be). Ce tri est considéré égal à 90% pour les déchets de verre et 75% pour les papiers et cartons. Ainsi, cette proportion de déchets sera considérée comme recyclée et non mise en décharge. Conformément aux statistiques belges, 40% des 1500g de déchets ménagers journaliers par personne sont envoyés à l'incinération avec un rendement de 85%. Les distances du site à la décharge pour les déchets ménagers sont de 10km, 100km jusqu'à l'incinérateur et 50km jusqu'au site de recyclage.

5.1.1.5. Transports

Nous prenons également en compte dans notre étude la composante mobilité. Ainsi, l'impact environnemental des trajets quotidiens des occupants est calculé. Nous considérons que 80% des occupants effectuent un trajet journalier. Ce qui revient à considérer que 20% des occupants du quartier sont des étudiants utilisant le vélo ou se déplaçant à pied sur le site du Sart-Tilman.

Pour les autres occupants, une distance moyenne de 20 km est indiquée en ce qui concerne les déplacements quotidiens domicile-travail. Ils sont effectués 5 jours par semaine 47 semaines par an. Les trajets domicile-commerce sont eux de 10 km aller-retour (distance entre le site et la zone commerciale de Bonnelles). Ils sont effectués une fois par semaine, 47 semaines par an.

5.1.1.6. Résultats de l'ACV à l'échelle des bâtiments

Après calcul par le logiciel, nous obtenons les résultats concernant l'ACV à l'échelle des différents bâtiments. Les résultats pour les dix bâtiments sont très proches et en voici un exemple (bâtiment A3) :

Impact	Unité	Valeur sur 80ans	Valeur par habitant et par an	Valeur par m² et par an
Effet de serre (100 ans)	t CO2 eq.	2586,1	1,115	0,035
Acidification	kg SO2 eq.	10198,5	4,396	0,139
Demande cumulative d'énergie	GJ	73935,2	31,869	1,010
Eau utilisée	m³	135936,1	58,593	1,858
Déchets produits	t	2173,5	0,937	0,030
Epuisement ressources abiotiques	kg d'antimoine eq.	23845,2	10,278	0,326
Eutrophisation	kg PO4 eq.	4423,5	1,907	0,060
Production d'ozone photochimique	kg d'éthylène eq.	705,1	0,304	0,010
Domage à la biodiversité	PDF.m².an	123317,3	53,154	1,685
Déchets radioactifs	dm³	76,5	0,033	0,001
Domage à la santé	DALYs	2,9	0,001	0,000
Odeur	Mm³ air	74614,9	32,162	1,020

Tableau 25 : Résultats de l'ACV du bâtiment A3 en termes d'impacts calculés

Vous trouverez le rapport détaillé de l'ACV du bâtiment A3 en annexes.

Afin de valider l'ordre de grandeur de nos résultats, nous les comparons à ceux de différentes ACV réalisées à l'échelle du bâtiment notamment celle de Rossi et al. (2012).

5.1.2. Données à l'échelle du quartier

Une fois les ACV des différents bâtiments terminés, il faut agréger les résultats et y ajouter tous les impacts émanant du quartier. Nous passons ici à une échelle supérieure. Ainsi, il est nécessaire de décrire précisément le site afin de mesurer :

- L'impact de la construction et du fonctionnement des équipements publics (réseaux d'eau, d'électricité...).
- L'impact des bâtiments construits (issus des ACV précédemment réalisées).
- L'impact de l'aménagement des espaces publics (voiries, espaces verts...).

5.1.2.1. Site

De la même manière que nous l'avons fait pour les bâtiments, nous renseignons quelques données clés concernant le site.

Premièrement, le mix énergétique utilisé pour l'électricité consommée par les éclairages publics nous est demandé. Evidemment, nous renseignons le même mix que celui utilisé pour les bâtiments.

Les distances de transports entre usine et site et site et centres de gestion des déchets sont également les mêmes que celles spécifiées pour les bâtiments précédemment.

La pluviométrie considérée est de 800 l/m².an. Une partie de cette eau sera dirigée vers le réseau et devra faire l'objet d'un traitement spécifique. Une autre partie sera dirigée vers des systèmes de rétention d'eau. Ses systèmes constituent des espaces tampons permettant de diminuer le volume d'eaux à traiter en cas de forte pluie.

Nous considérons, dans le cas de base, l'absence de systèmes de récupération des eaux de pluie afin de mesurer l'impact de leur présence plus tard. Ainsi, 0% des eaux de pluie n'est évacuée via un réseau séparatif dans un premier temps.

Nous prenons en compte dans notre analyse les réseaux enterrés d'eau potable et d'eaux usées. Nous comptabilisons les impacts provoqués par leur construction et par leurs pertes. Après avoir effectué un métré rapide, nous comptabilisons 1200m de canalisations dédiées à l'eau potable et autant dédiées aux eaux usées. Les conduites du réseau d'eau potable sont constituées à 50% de polyéthylène et à 50% de fonte ductile. Ses pertes sont estimées à 15%. Pour le polyéthylène, la durée de vie est de 75 ans et un entretien est nécessaire tous les 40 ans. Pour la fonte, la durée de vie est de 100 ans et un entretien est nécessaire tous les 50 ans. Concernant le réseau d'eaux usées, les pertes sont estimées à 3% et la durée de vie de 75 ans. L'entretiens est nécessaire après 40 ans.

5.1.2.2. Bâtiments

Afin de calculer les indicateurs supplémentaires que nous avons présentés en début de chapitre, nous devons indiquer l'utilisation précédente des sols construits. Nous pouvons considérer que le site, n'étant ni construit avant l'opération, ni cultivé, ni dédié à un espace vert urbain, pouvait s'apparenter à une jachère permanente.

5.1.2.3. Espaces publics

Pour finir, intéressons-nous aux espaces publics présents dans le quartier. En voici la liste et les caractéristiques :

- Allées, places et parkings
 - Surface : 8000m²
 - Imperméabilité : 85%
 - Eclairage : Sodium (3kWh/m²/an)
 - Durée de vie 100 ans
 - Composition : Pavés de béton de 7cm
- Espaces verts, jardins
 - Surface : 19800m² dont 1000m² de plan d'eau
 - Imperméabilité : 40%
 - Entretien : 12 tontes/an pour les jardins privés
 - Déchets : 80% des déchets organiques compostés sur site
- Rues
 - Surface : 2100m²
 - Imperméabilité : 90%
 - Eclairage : Sodium (4.8kWh/m²/an)
 - Durée de vie 100 ans
 - Composition : Couche de béton bitumineux de 5cm + mélange gravier béton de 10cm

Toutes les surfaces sont considérées comme étant précédemment des terres en jachères permanentes.

5.1.2.4. Résultats du scénario de base

Après calcul via le logiciel, les résultats obtenus sont les suivants :

Impact	Construction	Utilisation	Rénovation	Démolition	Total
Effet de serre (100 ans) (t CO2 eq.)	1 340.73	20 242.92	97.60	52.38	21 733.64
Acidification (kg SO2 eq.)	4 126.27	78 756.54	1 032.04	377.64	84 292.49
Demande cumulative d'énergie (GJ)	17 663.39	509 331.29	4 081.31	1 309.50	532 385.49
Eau utilisée (m ³)	79 708.77	724 317.40	1 759.22	975.23	806 760.62
Déchets produits (t)	826.20	7 281.24	371.63	5 332.21	13 811.28
Epaissement ressources abiotiques (kg d'antimoine eq.)	7 267.52	165 099.14	1 548.55	564.07	174 479.29
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	807.14	41 545.40	366.27	75.22	42 794.03
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	336.16	5 256.74	55.91	11.04	5 659.85
Domage à la biodiversité (PDF.m ² .an)	22 614.47	848 177.80	18 298.61	1 004.49	890 095.38
Déchets radioactifs (dm ³)	106.39	446.00	1.48	0.21	554.08
Domage à la santé (DALYs)	1.06	20.85	0.31	0.08	22.29
Odeur (Mm ³ air)	11 152.42	2 085 882.72	2 698.31	1 866.63	2 101 600.08
Potentiel de dégradation lié à la transformation du sol (m ²)					1 438 880.00
Pourcentage d'imperméabilisation (%)					64.23
Potentiel de dégradation lié à l'occupation du sol (m ² .an)					28 630.00
Surface totale du territoire étudié (m ²)					35 480.00
Pourcentage de surface bâtie (%)					18.55

Tableau 26 : Résultats de l'ACV à l'échelle du quartier (cas initial)

Vous trouverez le rapport détaillé des résultats de l'ACV du quartier initial en annexe.

5.1.2.5. Analyse et validation des résultats

Premièrement, nous allons vérifier l'ordre de grandeur de nos résultats. Nous comparons ceux-ci aux résultats présents dans la littérature scientifique. Lotteau et al. (2015a) effectue une revue critique de l'état de l'art concernant l'ACV à l'échelle du quartier. Il compile les résultats de ces études dans différentes tables et graphiques.

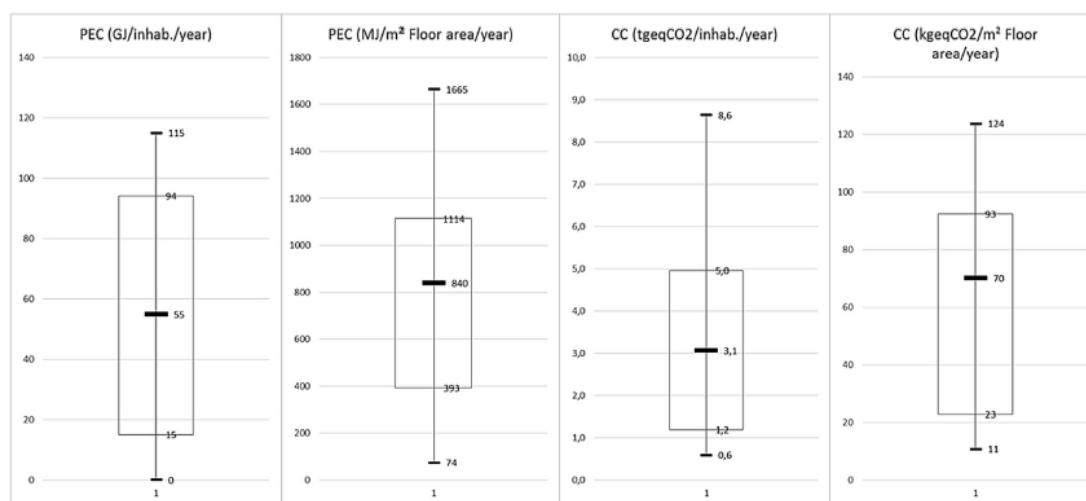


Figure 8 : Primary energy consumption and climate change ; min, Q1, median, Q3 and max values (Lotteau et al., 2015a)

Nous nous trouvons pour chacune des valeurs ci-dessus dans l'intervalle marquée par le Q1 et le Q3. Nos résultats sont donc d'un bon ordre de grandeur. Attention, cette vérification n'atteste cependant pas de la véracité absolue de nos résultats.

Nous allons maintenant tenter de mettre en avant les sources d'impacts les plus importantes et leurs répartitions suivant les différentes étapes du cycle de vie.

Nous nous intéressons premièrement à l'impact « effet de serre ». Nous remarquons la forte prédominance de la phase d'occupation qui concentre 93% de production de GHG. Au sein de cette phase, la mobilité est fortement majoritaire avec 46% des émissions. Viens ensuite le couple chauffage et ECS qui représente 24% des émissions et le traitement des déchets comptabilisant 15% des émissions de la phase d'utilisation.

Effet de serre (100 ans) (t CO2 eq.)

Etape	Usage	Valeur t CO2 eq.	
Construction		1340,73	6,2%
	Cloisons	143,24	11%
	Équipement	11,34	1%
	Espace public : Déchets	1,34	0%
	Espace public : Revêtement	180,7	13%
	Espace public : Transport divers	29,64	2%
	Façades	288,94	22%
	Fenêtres	-1,63	0%
	Plancher bas	211,54	16%
	Plancher intermédiaire	256,23	19%
	Portes	4,78	0%
	Toitures	154,22	12%
	Transport	60,38	5%

Utilisation		20242,92	93,1%
Chauffage		1752,16	9%
Déchets		2977,23	15%
Eau		1015,16	5%
ECS		3088,69	15%
Electricité spécifique		1841,43	9%
Espace public		264,5	1%
Transport		9303,75	46%

Rénovation		97,6	0,4%
	Cloisons	13,45	14%
	Équipement	34,03	35%
	Espace public : Déchets	1,54	2%
	Espace public : Revêtement	9,71	10%
	Espace public : Transport divers	4,45	5%
	Façades	10,3	11%
	Fenêtres	-3,25	-3%
	Plancher intermédiaire	10,62	11%
	Portes	9,56	10%
	Toitures	5,38	6%
	Transport	1,82	2%

Démolition		52,38	0,2%
	Cloisons	6,3	12%
	Façades	7,01	13%
	Plancher bas	8,59	16%
	Plancher intermédiaire	11,94	23%
	Toitures	3,99	8%
	Transport	14,55	28%

Tableau 27 : Résultats détaillés du calcul de l'impact « effet de serre » à l'échelle du quartier (cas initial)

Nous remarquons déjà quelques faits marquants :

- Les émissions dues à la gestion des déchets ménagers sont comparables à celles dues à la production d'ECS (15% des émissions de la phase d'utilisation)
- Les émissions dues au chauffage ne représentent que deux tiers des émissions dues à la production d'ECS
- Les émissions dues à la mobilité des habitants représentent quasiment la moitié des émissions de la phase utilisation.

Ces caractéristiques sont notamment dues au fait que la performance thermique élevée de nos bâtiments diminue fortement leurs consommations de chauffage.

Considérons maintenant l'impact « demande d'énergie cumulative ». Ce terme est défini par l'association des ingénieurs allemands (VDI) comme « la demande totale, exprimée en énergie primaire, associée à la production, l'usage et la mise à disposition d'un bien économique qui peut lui être attribué dans une relation de causalité » (VDI4600, 1997). L'énergie primaire est ici entendue comme « le contenu énergétique des vecteurs d'énergie qui n'ont été soumis à aucune conversion » (VDI4600, 1997).

Demande cumulative d'énergie (GJ)

Etape	Usage	Valeur GJ	
Construction		17663,39	3%
	Cloisons	1687,09	10%
	Equipement	205,3	1%
	Espace public : Déchets	37,41	0%
	Espace public : Revêtement	1906,23	11%
	Espace public : Transport divers	512,08	3%
	Façades	4720,35	27%
	Fenêtres	635,81	4%
	Plancher bas	2404,08	14%
	Plancher intermédiaire	1873,97	11%
	Portes	93,68	1%
	Toitures	2543,85	14%
	Transport	1042,95	6%

Utilisation		509331,29	96%
	Chauffage	29983,1	6%
	Déchets	160134,34	31%
	Eau	7100,88	1%
	ECS	52864,53	10%
	Electricité spécifique	57928,23	11%
	Espace public	3993,74	1%
	Espace public : Déchets	834,38	0%
	Espace public : Eau	6046,52	1%
	Espace public : Electricité	31971,09	6%
	Espace public : Transport divers	71,82	0%
	Transport	158390,05	31%

Rénovation		4081,31	1%
	Cloisons	392,52	10%
	Equipement	615,69	15%
	Espace public : Déchets	43,09	1%
	Espace public : Revêtement	694,85	17%
	Espace public : Transport divers	76,95	2%
	Façades	300,61	7%
	Fenêtres	1271,61	31%
	Plancher intermédiaire	309,37	8%
	Portes	187,37	5%
	Toitures	157,08	4%
	Transport	31,37	1%

Démolition		1309,5	0%
	Cloisons	176,33	13%
	Façades	196,03	15%
	Plancher bas	240,27	18%
	Plancher intermédiaire	333,33	26%
	Toitures	111,57	9%
	Transport	251,36	19%

Tableau 28 : Résultats détaillés du calcul de l'impact « demande cumulative d'énergie » à l'échelle du quartier (cas initial)

Ici aussi, la phase d'utilisation est prédominante (96% de la demande cumulative d'énergie totale), notamment du fait de la comptabilisation de la mobilité et de la gestion des déchets.

Nous remarquons également quelques résultats marquants :

- La demande cumulative d'énergie due à la gestion des déchets est comparable à celle due à la mobilité des habitants et équivaut quasiment à un tiers de la demande de la phase d'occupation.
- La demande d'énergie cumulative due aux transports et à la gestion des déchets durant la phase d'utilisation est de 60% de la demande cumulative totale d'énergie du quartier sur tout son cycle de vie.
- La demande cumulative d'énergie due au couple chauffage + ECS ne vaut que la moitié de celle due aux transports des habitants ou de celle due à la gestion des déchets ménagers.

Nous pouvons ainsi déjà remarquer la très forte participation de la composante mobilité et de la composante de gestion des déchets ménagers dans l'ACV à l'échelle du quartier.

Passons maintenant à l'étude des différents scénarios de conception et à l'analyse de l'impact des différents paramètres étudiés. Vous trouverez systématiquement en annexe les rapports détaillés des ACV des différents scénarios.

Chapitre 6: Impact de l'orientation

Nous allons ici étudier l'incidence de l'orientation sur les résultats de l'ACV à l'échelle du quartier.

6.1. Scénarios

Dans notre scénario initial, la majorité des bâtiments sont positionnés de manière à ce que les façades longitudinales soient orientées vers le nord et vers le sud. Nous nommerons ce scénario initial « orientation 0° ». Nous testerons d'autres orientations en faisant subir au plan masse une rotation sur lui-même de 45°, de 90°, et de 180°. Nous effectuerons une STD de tous les bâtiments pour chacune des orientations. Ensuite, nous sélectionnerons l'orientation la plus défavorable et effectuerons l'ACV complète du quartier pour cette orientation. Enfin, nous comparerons les résultats de cette ACV à celle du quartier de base afin d'être capable de quantifier l'impact de l'orientation sur l'ACV d'un quartier.

6.2. Résultats

Premièrement, voici les résultats de la STD des différents bâtiments pour les différentes orientations :

Bâtiments	Besoins de chauffage (kWh/m².an)				
	Orientation				
	0°	45°	90°	135°	180°
A3	15	16	17	16	14
B2	13	14	16	15	15
B3	13	14	15	14	14
D1	20	21	22	20	18
D2	20	21	22	20	19
D3	19	20	20	19	20
D4	17	18	20	20	19
C1	12	13	14	13	13
C2	13	14	14	12	12
C3	12	13	14	13	13
Moyenne	15,4	16,4	17,4	16,2	15,7

Tableau 29 : Résultats de la STD des différents bâtiments du quartier pour différentes orientations

Nous observons une augmentation moyenne pour la totalité des bâtiments de 1 à 2 kWh/m²/an en fonction de l'orientation. Pour une rotation de 180° du quartier, les différences de besoins de chauffages sont minimales (2%). Elles sont dues à la proportion de vitrage différente entre la façade Nord et la façade Sud. Cependant, pour une rotation de 90° du quartier, on remarque une augmentation des besoins de chauffage de 13%. Nous effectuerons donc l'ACV du quartier entier dans son orientation 90°.

Ce relativement faible impact de l'orientation sur les besoins de chauffage s'explique par le caractère très performant de l'isolation thermique de nos bâtiments. Cependant, nous remarquons que lorsqu'une rotation de 90° est effectuée, trois des six bâtiments étants passifs initialement ne le sont plus.

Passons maintenant aux résultats de l'ACV. Evidemment, à part l'orientation du site et donc les résultats de la STD des bâtiments, aucun autre paramètre n'as été modifié. Voici les résultats comparatifs de l'ACV à l'échelle du quartier dans l'orientation 0° et 90°.

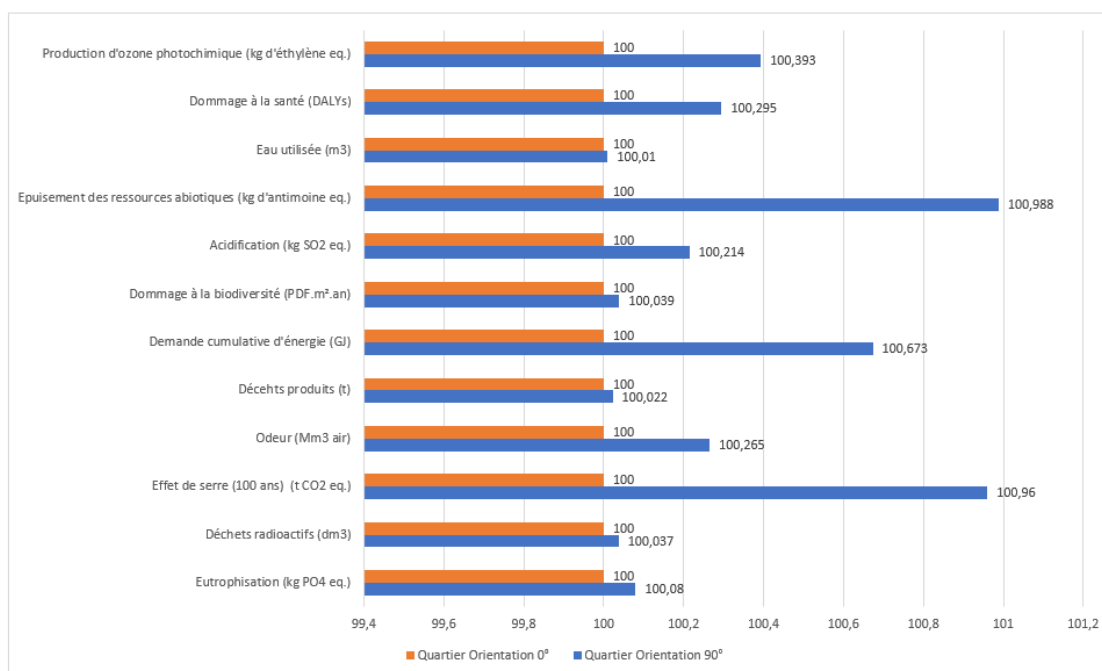


Figure 9 : Comparaison des impacts environnementaux des scénarios « orientation 0° » et « orientation 90° » (unité fonctionnelle : quartier entier)

Nous remarquons qu'une fois tous les impacts à l'échelle du quartier comptabilisés, l'influence de l'orientation deviens minime. En effet, c'est principalement sur l'effet de serre, sur la demande cumulative d'énergie et sur l'épuisement des ressources abiotiques que l'orientation joue. Ceci est dû à la modification des consommations énergétiques dues au chauffage. Cependant, nous n'observons qu'une augmentation relative de moins de 1% de ces impacts. De plus, cette évolution ne touche que la phase d'utilisation.

Nous observons une augmentation de 1% des émissions de gaz à effet de serre, de l'épuisement des ressources abiotiques et de la demande d'énergie cumulative durant la phase d'utilisation dans le cas d'une rotation de 90°. Ceci est dû à l'augmentation des consommations de gaz causée par l'augmentation des besoins de chauffage.

Cela dit, si nous comparons les scores des indicateurs environnementaux uniquement pour le poste chauffage durant la phase d'utilisation et pour les deux orientations, nous remarquons une augmentation de 11% de l'effet de serre, de la demande cumulative d'énergie et de l'épuisement des ressources abiotiques pour l'orientation 90°.

Ainsi, l'orientation a bien un impact sur les consommations de chauffage et sur les indicateurs environnementaux se rapportant uniquement à celles-ci. Cependant, à l'échelle du quartier entier, l'orientation a peu d'incidence sur les résultats globaux de l'ACV.

Cependant, même si l'orientation influe peu sur les résultats de l'ACV à l'échelle du quartier, à l'échelle des bâtiments, elle peut être déterminante, notamment pour l'obtention du label passif.

Chapitre 7: Impact de la gestion des eaux

7.1. Scénarios

Dans notre scénario initial, nous ne considérons aucuns systèmes de récupération d'eau de pluie. Il n'y avait pas de réseau séparatif et les revêtements de sols n'étaient pas travaillés de manière à offrir une forte perméabilité. Ainsi la totalité des eaux pluviales devaient être reprises dans le réseau des eaux usées et traitées. Cependant, nous ne considérons pas d'usage d'eau potable pour l'arrosage des jardins.

Nous allons ici étudier un scénario intégrant une réflexion plus poussée sur la gestion des eaux pluviales. Pour chaque espace public, la quantité d'eau à traiter est mesurée de la manière suivante :

$$Q_e = (E_{pot} + E_{pluie}) \times Eff_{ass} \times (1 - Ret) \times Imp \times S \times D \quad [m^3]$$

Avec :

E_{pot} = Eau potable utilisée pour l'arrosage et l'entretien $[m^3/m^2/an]$

E_{pluie} = Eau de pluie $[m^3/m^2/an]$

Eff_{ass} = Efficacité du réseau d'assainissement

Ret = Proportion de l'eau dirigée vers les systèmes de rétention d'eau

Imp = Imperméabilité de l'espace étudié

S = Surface de l'espace étudié $[m^2]$

D = Durée de l'analyse $[an]$

Le but de la conception est de détourner le plus possible d'eau de pluie du réseau des eaux usées vers un réseau séparatif. Ceci dans le but de décharger les centres de traitement. Ainsi, nous remarquons que si un ensemble de systèmes est mis en œuvre de manière à récupérer 100% des eaux pluviales dans des noues, plans d'eau, citernes ou fossés, travailler sur la perméabilité des revêtements de sol est inutile. En effet, l'eau de ruissellement est de toute manière reprise par ces systèmes. Au contraire, si peu de systèmes de récupération des eaux de pluie sont mis en œuvre, permettre à ces eaux de s'infiltrer directement dans le sol grâce à des revêtements perméable est intéressant.

Ainsi, nous travaillerons sur deux scénarios. Un premier scénario s'intéressera aux systèmes de récupération des eaux de pluie et un autre à la perméabilité des sols.

7.1.1. Systèmes de récupération des eaux pluviales

Dans ce scénario, des citernes de récupération des eaux de pluies sont modélisées. Cette eau de pluie sera utilisée pour l'arrosage des jardins, le nettoyage des espaces extérieurs et intérieurs les chasses d'eau et le lave-linge. Nous avons au total 6580 m² de surface de récupération constituée par les toitures gravillonnées des dix bâtiments. De plus, les eaux de pluies seront prises en charge par un réseau séparatif constitué non seulement de ces citernes mais également de plans d'eau, de noues, de fossés. L'eau des jardins est reprise par les fossés et les noues et dirigée vers un plan d'eau, de même que l'eau des allées, places et parking. L'eau récupérée sur les toitures est stockée dans les citernes dont le trop plein se décharge dans les noues. Ainsi, nous considérons que la totalité des eaux pluviales du site sont gérées par un réseau séparatif et qu'aucune partie de ces eaux ne sera prise en charge par le réseau des eaux usées. Cependant, les sols gardent leur perméabilité initiale.

7.1.2. Sols perméables

Dans ce scénario, nous mettons en œuvre des revêtements de sols plus perméables que dans l'option de base. Ainsi, les allées, places et parkings sont travaillés avec des revêtements en pavés de béton non rejointoyés et en dalles de béton-gazon. Ainsi, l'imperméabilité totale du site passe de 66% dans l'état initial à 58% une fois les revêtements perméables mis en œuvre. Cette faible différence entre les moyennes de perméabilité des deux scénarios s'explique par la forte proportion d'espaces verts dans notre quartier qui ne voient pas leur perméabilité modifiée entre les deux scénarios. La grande proportion d'espaces verts du site explique sa relativement forte perméabilité dès l'état initial. Dans ce scénario, nous considérons qu'aucun autre système de récupération des eaux de pluies n'est mis en œuvre. La totalité des eaux ne s'infiltrant pas directement dans le sol est donc envoyée vers le réseau des eaux usées.

7.2. Résultats

7.2.1. Impact des systèmes de récupération des eaux de pluie

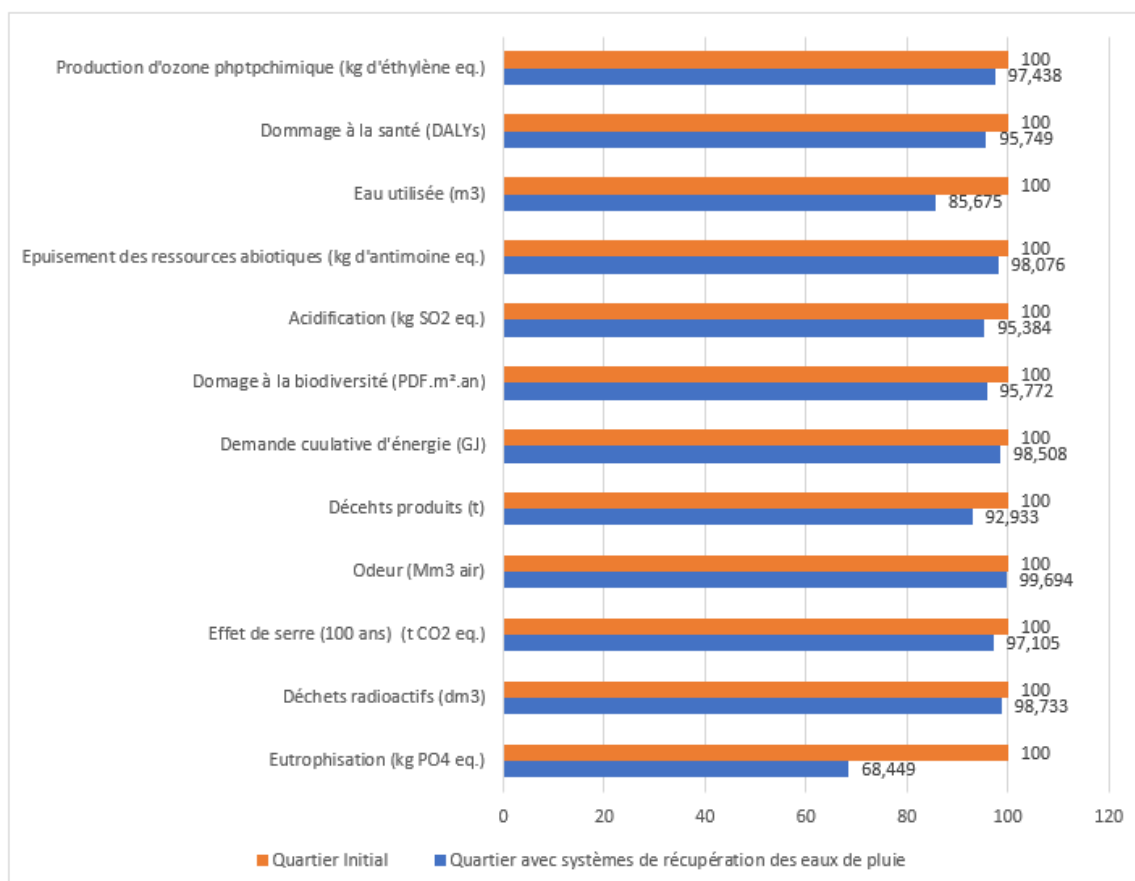


Figure 10 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios avec et sans systèmes de récupération des eaux de pluie (unité fonctionnelle : quartier entier)

Nous remarquons que mettre en place des systèmes de récupération d'eau de pluie impacte fortement certains indicateurs environnementaux.

En premier lieu, recueillir la totalité des eaux de pluie permet de faire diminuer de 32% l'eutrophisation. Cette diminution importante est due au fait que les eaux de ruissellement sont ici entièrement récupérées sur site par les noues et bassins d'infiltration. Ainsi les nutriments ne sont pas entraînés mais retenus sur le site.

Ensuite, les consommations d'eau potable sont également fortement impactées. En effet, avec une citerne bien dimensionnée, il est possible de n'utiliser que de l'eau de pluie pour alimenter lave-linges et chasses d'eau. Ainsi, la consommation d'un volume conséquent d'eau potable peut être économisé, plus de 6000l par personne et par an. Cela permet de diminuer de 14% les consommations d'eau du quartier à l'échelle de son cycle de vie total.

On peut également remarquer une diminution de 7% des déchets produits sur l'ensemble du cycle de vie du quartier. En effet, sur la phase d'utilisation 15% de déchets en moins sont produits. Il s'agit de l'eau de ruissellement qui n'est maintenant plus dirigée vers les stations d'épuration et qui n'as donc plus à être traitée.

Enfin, nous observons une diminution de 4% environ des dommages à la biodiversité, des dommages à la santé et de l'acidification.

7.2.2. Impact de la perméabilité des sols

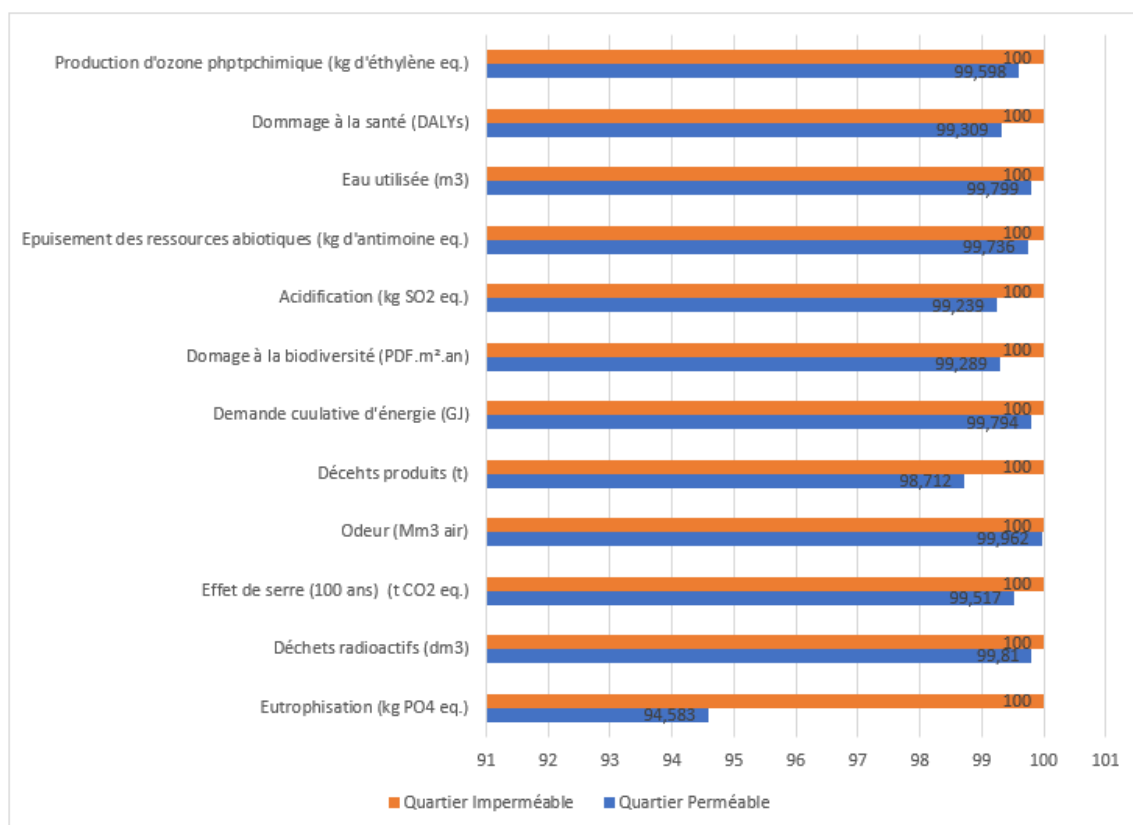


Figure 11 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios avec et sans revêtements de sols perméables (unité fonctionnelle : quartier entier)

L'impact de la perméabilité des sols sur l'ACV totale du quartier est plus faible. En effet, les indicateurs concernés sont toujours l'eutrophisation et la production de déchets, mais en moindre mesure. Dans le cas présent, la mise en œuvre de sols perméables permet de diminuer de 5% les impacts liés à l'eutrophisation et de 1% la production de déchets sur la totalité du cycle de vie du quartier. En effet, la quantité d'eau qui s'infiltre dans le sol grâce aux revêtements perméables est moindre par rapport à la quantité qui peut être récupérée par les systèmes de récupération présentés dans le scénario précédent.

7.2.3. Comparaison des trois scénarios

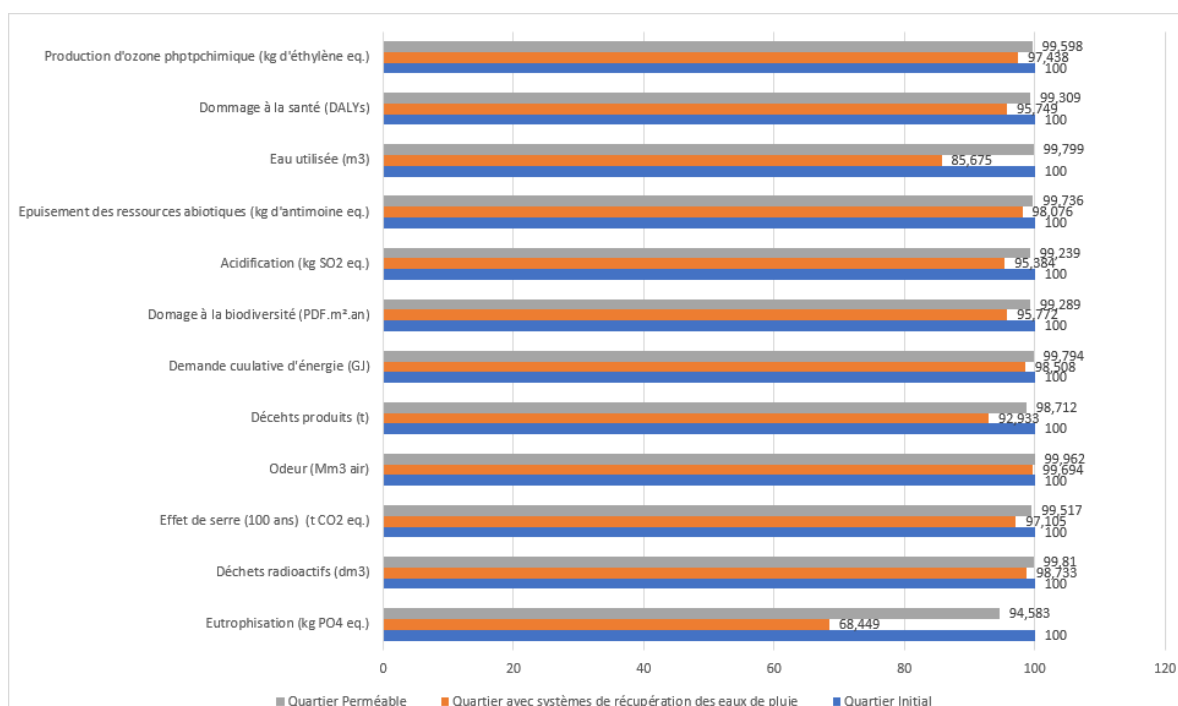


Figure 12 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios initial, avec et sans revêtements de sols perméables (unité fonctionnelle : quartier entier)

Ainsi, il est plus efficace de mettre en place des systèmes de récupération de type citernes, noues ou bassins d'infiltration à l'échelle du quartier. Cependant, mettre en œuvre des revêtements perméables sur les zones ne pouvant pas bénéficier de systèmes de récupération aura un impact positif sur la quantité d'eaux usées à traiter et sur l'eutrophisation.

Chapitre 8: Impact de la mobilité

Intéressons-nous maintenant à l'impact de la mobilité sur le bilan environnemental du quartier.

8.1. Scénarios

Dans notre scénario de base nous avons considéré un recours important à l'automobile pour les trajets quotidiens. Nous comparerons ce scénario avec un deuxième où le site est considéré comme urbain, parfaitement intégré aux réseaux de transport en commun et à faible distance des commerces de premières nécessités. Récapitulons les hypothèses de mobilité :

- Scénario initial :
 - 80% des occupants effectuent le trajet quotidiennement.
 - La distance domicile-travail de 20km est effectuée quotidiennement en voiture.
 - La distance domicile-commerces de 5km est effectuée hebdomadairement en voiture.
- Scénario « Site urbain » :
 - 100% des occupants effectuent le trajet quotidiennement.
 - La distance domicile-travail de 2.5km est effectuée quotidiennement en bus.
 - La distance domicile-commerces de 300m est effectuée hebdomadairement en vélo ou à pied.

8.2. Résultats

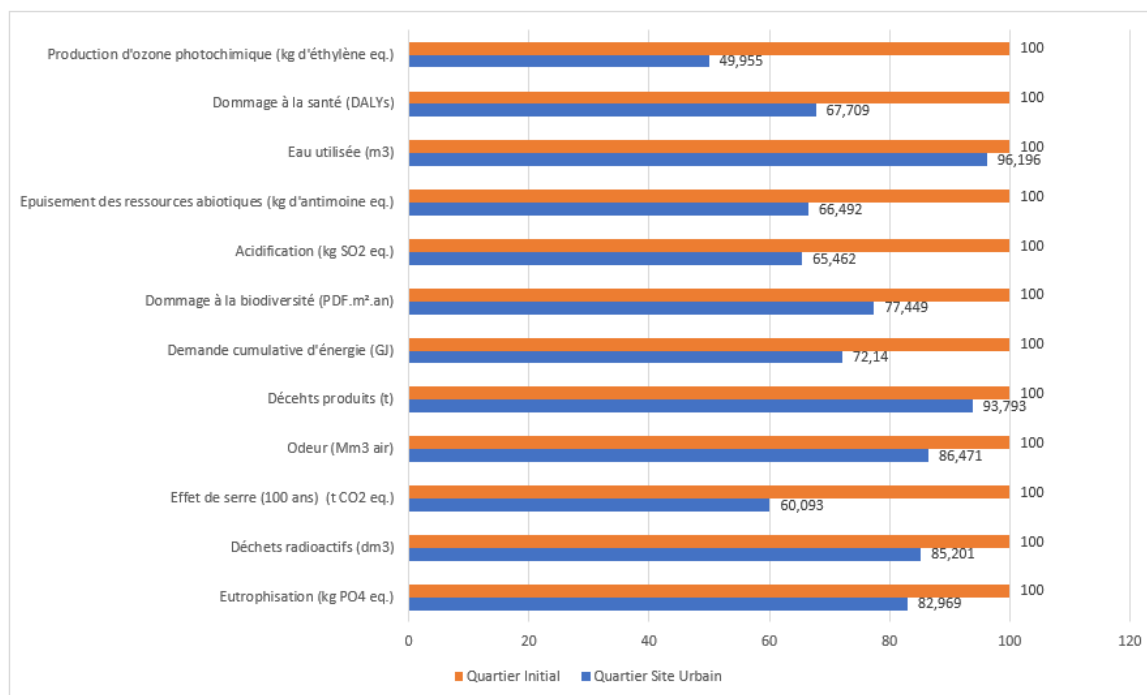


Figure 13 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios de mobilité (unité fonctionnelle : quartier entier)

Il est maintenant évident que la mobilité a un impact énorme sur le bilan environnemental du quartier. Tous les indicateurs d'impact environnementaux sont réduits de 6% à 50%. 7 indicateurs sur 12 sont réduits de plus de 20%.

En premier lieu, la production d'ozone photochimique est réduite de plus de 50% sur le cycle de vie total du quartier. En effet, la combustion des carburants est la principale source de production d'oxyde d'azote, qui se transforme en ozone sous l'effet de la lumière du soleil (Gervasio et al., 2014). Dans notre scénario en site urbain, 54% de la production d'ozone photochimique de la phase d'utilisation est évitée en diminuant le recours à l'automobile. En effet, 95% de la production d'ozone due aux transports durant la phase opérationnelle est évitée dans ce scénario. Le deuxième poste de production d'ozone photochimique est la gestion des déchets.

Concernant l'effet de serre, le constat est identique, nous observons une diminution de 40% des émissions sur le cycle de vie total du quartier, ceci grâce à une diminution de 93% des émissions dues aux transports durant la phase d'utilisation.

L'acidification est aussi fortement impactée par la suppression de l'usage de l'automobile. Nous observons une diminution de 35% de cet indicateur d'impact sur le cycle de vie entier du quartier. Il en est de même pour l'épuisement des ressources abiotiques et les dommages à la santé qui voient leur score réduit respectivement de 34%

et de 32%. En effet, beaucoup moins de carburant et de ressources fossiles sont consommées et la pollution responsable de nombreux problèmes de santé est également fortement réduite.

Diminuer l'utilisation de l'automobile permet de faire d'énormes économies d'énergie. Les transports en communs utilisent l'énergie contenue dans les carburants de manière plus efficace et rationnelle. Ainsi, la demande d'énergie cumulative est réduite de 28%.

Enfin, nous observons une diminution de 23% des dommages faits à la biodiversité, de 17% de l'eutrophisation, de 15% de déchets radioactifs, de 13% des odeurs et de 6% des déchets produits.

Ainsi, la mobilité et le recours à des véhicules personnels pour effectuer les distances domicile travail journaliers a un impact énorme sur le bilan environnemental du quartier. Les indicateurs d'impacts liés au climat sont les plus touchés. Il est possible de les réduire de moitié. La demande cumulative d'énergie, l'acidification, l'épuisement des ressources biotiques et les dommages à la santé peuvent quant à eux être réduits d'un tiers grâce à une mobilité raisonnée.

Chapitre 9: Impact de la densité

9.1. Scénarios

9.1.1. Densité Verticale

Dans cette partie, nous allons mesurer l'impact de la densité sur l'ACV du quartier. Dans notre scénario initial, nos bâtiments étaient majoritairement en R+1, avec quelques R+2 pour les bâtiments du groupe D. Dans le scénario « Densité Verticale » nous élevons chaque bâtiment d'un étage supplémentaire. Ces nouveaux étages sont identiques à l'étage sur lequel ils viennent s'implanter et sont divisé en zones thermiques « jour » et « nuit » de même surface totale. Ainsi, nous augmentons la densité bâtie de notre quartier et par conséquent le nombre d'habitants. Là où le quartier dans son état initial comptabilisait 220 habitants, le scénario « densité + » en abrite 321.

Nous allons effectuer à nouveau la simulation thermique dynamique de tous nos bâtiments avec un étage en plus et ensuite réaliser l'ACV du quartier.

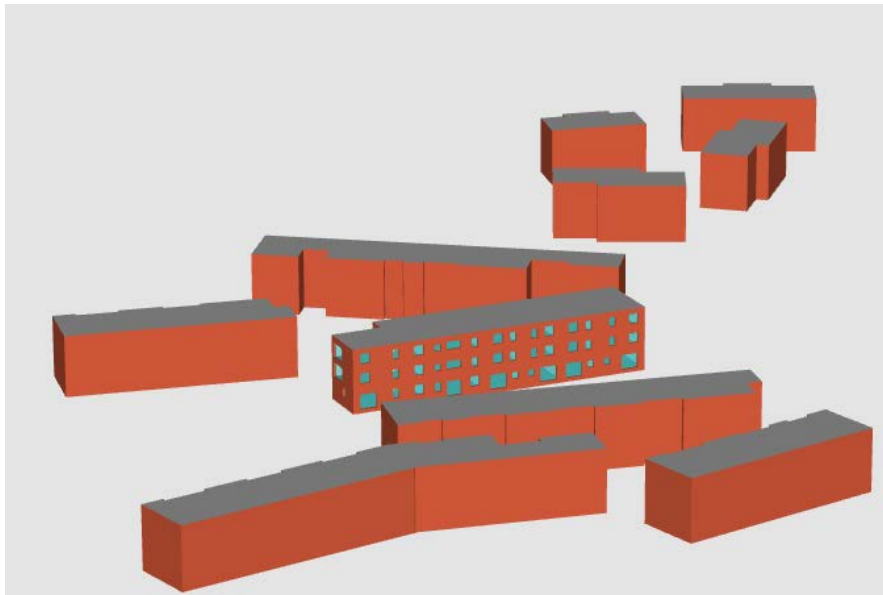


Figure 14 : Vue du modèle 3D du quartier dans la configuration « densité + » tel que présenté dans le logiciel Pléiades (les ouvertures n'apparaissent que sur le bâtiment sélectionné)

9.1.2. Densité horizontale

Dans un scénario complémentaire, nous allons augmenter le nombre de bâtiments présents sur le site. Nous ajoutons 4 nouveaux bâtiments, afin d'obtenir la même surface bâtie que dans le scénario « densité verticale » et le même nombre d'habitants. Nous supprimons une portion d'espaces publics de la catégorie « allées, places et parkings » de manière à ce que la surface de notre site reste inchangée. De plus, nous considérons que les bâtiments ajoutés sont des copies identiques en tous points aux bâtiments A3, B2, C1 et D1 déjà existant au sein du quartier. Ainsi, nous sommes en mesure de comparer l'impact environnemental des deux types de densification du quartier.

9.2. Résultats

9.2.1. Résultats du scénario « densité verticale »

9.2.1.1. Résultats de la simulation thermique dynamique

Bâtiments	Besoins de chauffage (kWh/m ² .an)	
	Situation initiale	+1 étage
A3	15	14
B2	12	12
B3	14	13
D1	19	20
D2	20	20
D3	20	21
D4	18	19
C1	12	11
C2	13	12
C3	13	11
Moyenne	15,6	15,3

Tableau 30 : Besoins de chauffage des différents bâtiments du quartier dans la configuration de base et élevés d'un étage

Nous remarquons premièrement que les besoins de chauffage avec une étage supplémentaire baissent légèrement. Nous aurions pu imaginer que les ombrages supplémentaires créés agiraient comme des masques solaires ayant pour conséquence de diminuer les apports solaires et d'augmenter les besoins de chauffage. Cependant, il semblerait que l'augmentation de la compacité provoquée par l'élévation des bâtiments ait été plus impactante.

9.2.1.2. Résultats de l'analyse du cycle de vie

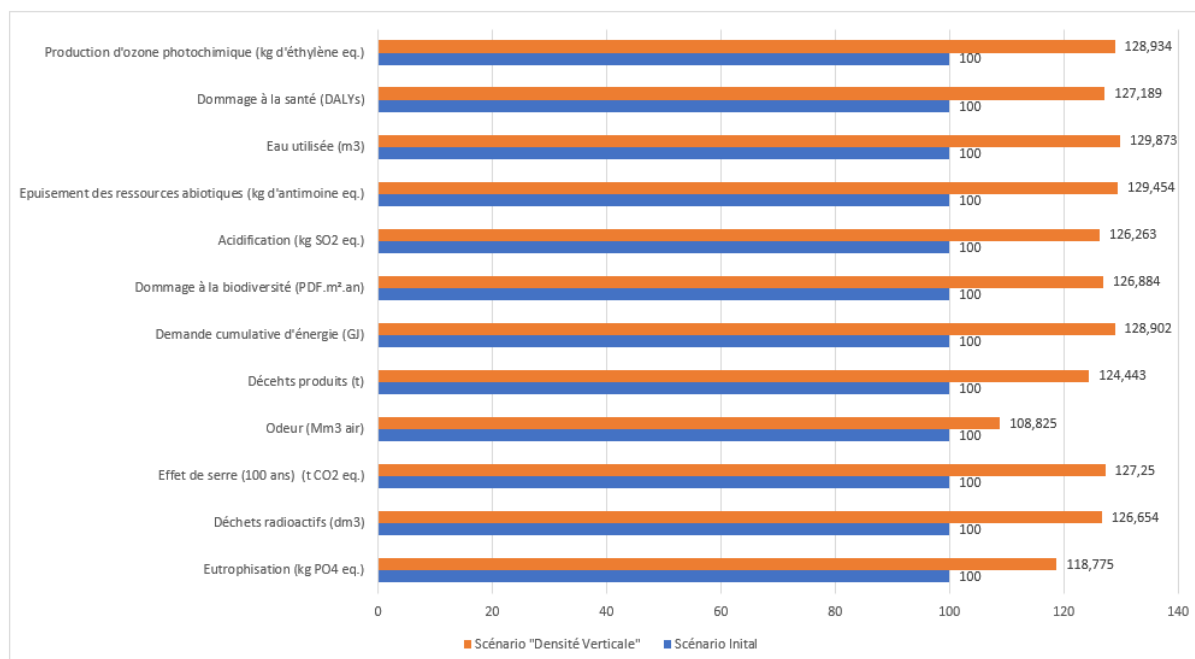


Figure 15 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios « initial » et « densité + » (unité fonctionnelle : quartier entier)

Les résultats présentés Figure 15 sont exprimés sur base de l'unité fonctionnelle englobant tout le quartier. Ainsi, il est logique de constater que les scores des indicateurs ont tous été augmentés dans des proportions assez identiques, d'environ 25% à 30%. En effet, la part des indicateurs liée aux bâtiments a été modifiée mais pas celle liée au quartier qui lui est resté inchangé. Cette unité fonctionnelle ne nous permet pas de tirer des conclusions intéressantes. C'est pourquoi nous allons traduire les résultats de l'étude dans l'unité fonctionnelle « occupant » pour pouvoir comparer les impacts par habitant dans les deux configurations.

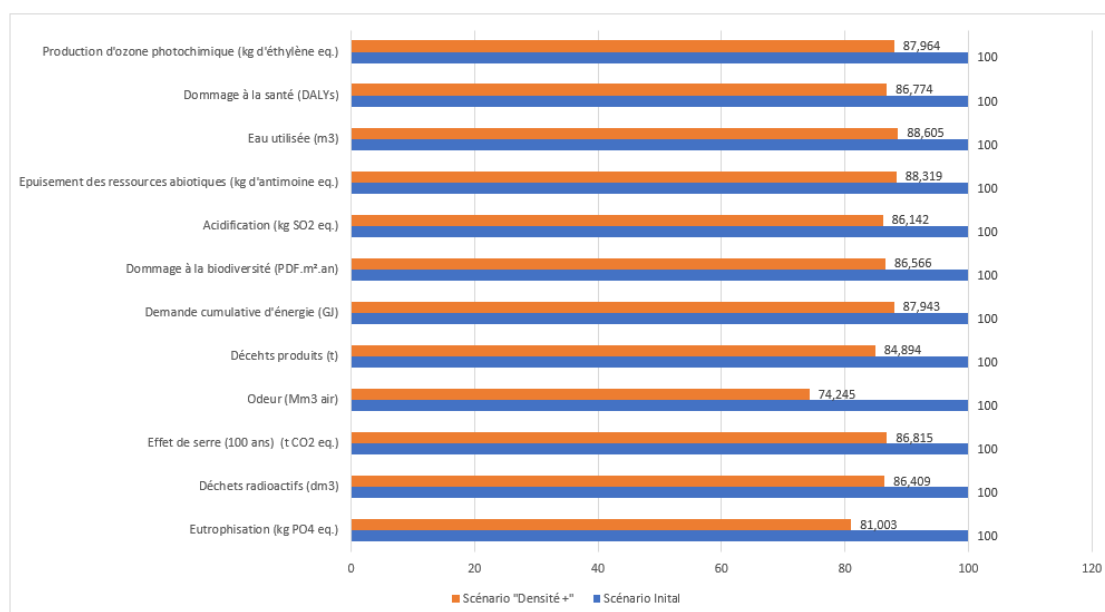


Figure 16 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios « initial » et « Densité Verticale » (unité fonctionnelle : occupant)

Si nous comparons les indicateurs environnementaux en les rapportant au nombre d'habitant, nous remarquons que le quartier élevé d'un étage a de meilleures performances environnementales.

L'indicateur « odeur » est réduit de 26% et l'eutrophisation de 19%. Les dix autres indicateurs sont réduits entre 11% et 15%. En effet, même le site accueille plus d'occupants et que les consommations de ceux-ci s'ajoutent aux consommations initiales, tous les impacts émanant du site lui-même et des espaces publics restent inchangés. Ainsi, la surface construite est mieux rentabilisée.

9.2.1. Résultats du scénario « densité horizontale »

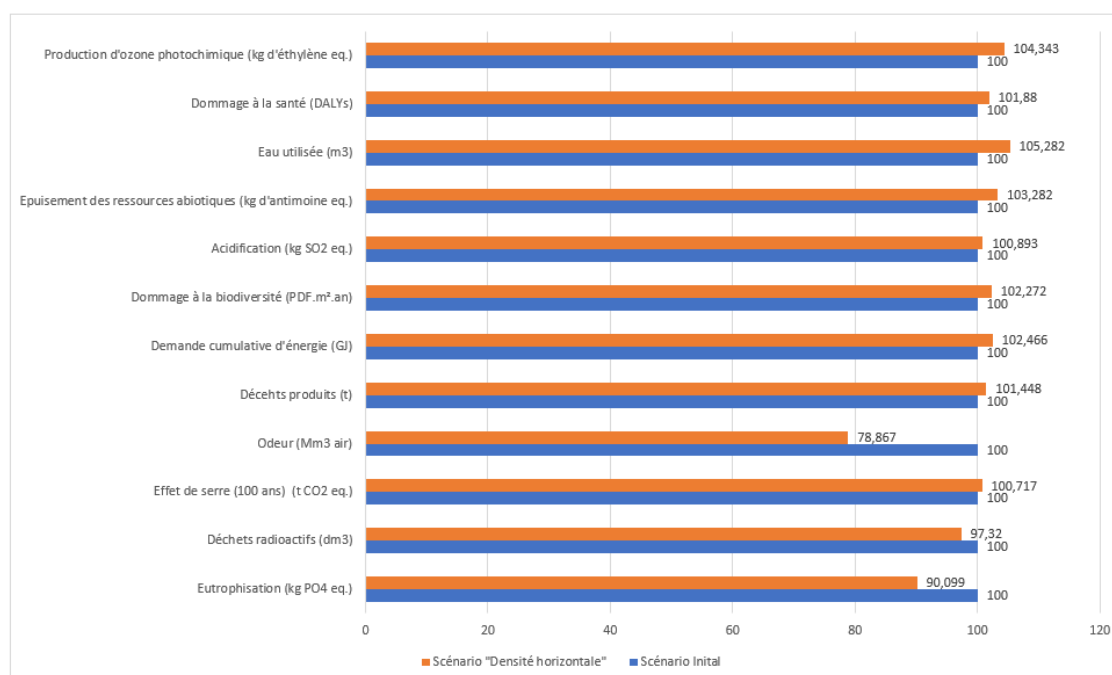


Figure 17 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios « initial » et « Densité Horizontale » (unité fonctionnelle : occupant)

Dans le cas d'une augmentation de la densité bâtie par ajout de bâtiments au site, les résultats ne sont pas aussi favorables que dans le cas précédent. En effet, à part les odeurs, les déchets radioactifs et l'eutrophisation, dont les scores diminuent respectivement de 21%, 3% et 10%, les autres indicateurs sont en hausse. Ils gagnent tous entre 1% et 5%. En effet, nous ne bénéficions pas ici d'un gain de compacité et nous ne mutualisons pas les réseaux. De plus, la construction de nouveaux bâtiments est plus gourmande en matériaux et énergie que l'élévation d'un étage.

9.2.2. Comparaison des trois scénarios

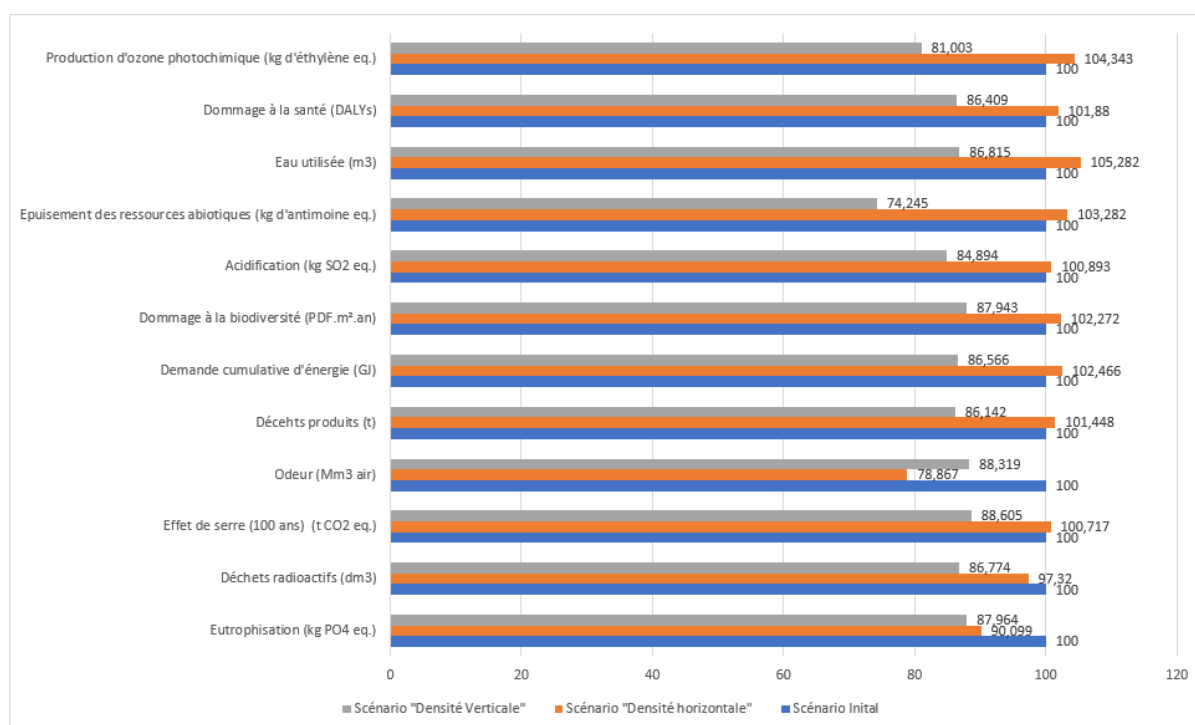


Figure 18 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios « initial », « Densité Horizontale » et « Densité Verticale » (unité fonctionnelle : occupant)

Ainsi, densifier le quartier de manière verticale est bien plus intéressant environnementalement. L'incidence sur l'ACV totale du quartier est bien plus prononcée que lors d'une densification horizontale, pour laquelle le bilan est mitigé.

Chapitre 10: Impact de l'utilisation d'énergies renouvelables

10.1. Scénarios

Dans ce chapitre, nous mesurerons l'impact sur l'ACV à l'échelle du quartier de l'installation de panneaux solaires photovoltaïques. Dans le scénario initial, toute l'électricité utilisée provenait du réseau électrique belge et les impacts de production étaient pris en compte. Dans cette nouvelle configuration, nous disposons une installation photovoltaïque sur toutes les toitures du site et nous considérons une surface de panneaux équivalente aux deux tiers de la surface de toiture pour chaque bâtiment. Il est à noter que nos logements n'utilisent l'électricité que pour s'éclairer et pour alimenter les appareils domestiques.

L'installation mise en place est constituée de panneaux solaires photovoltaïques monocristallins. Les capteurs sont posés à l'aide d'un support sur la toiture-terrasse. Ils sont orientés sud et inclinés de 35° , inclinaison optimale en Belgique.

Nous effectuons alors la simulation thermique de chaque bâtiment, et complétons par l'ACV complète du quartier.

10.2. Résultats

Au niveau de la simulation thermique dynamique, la consommation et la production d'électricité sont calculées. Pour la totalité des bâtiments, la production excède la consommation sur toute l'année sauf pour les mois de décembre et janvier où l'installation couvre respectivement 45% et 75% des consommations. En effet, les logements consomment en moyenne $12\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{an}$ d'électricité par an selon les résultats de la STD. Ces résultats concordent avec les moyennes belges concernant les logements ne se chauffant pas à l'électricité. Les panneaux solaires quant à eux produisent en moyenne sur l'année $26\text{kWh}/\text{m}^2$. Ainsi, à part pour les mois de janvier et décembre, aucune énergie électrique sera puisée dans le réseau Belge.

Les conséquences sur l'ACV du quartier sont présentées figure 19 :

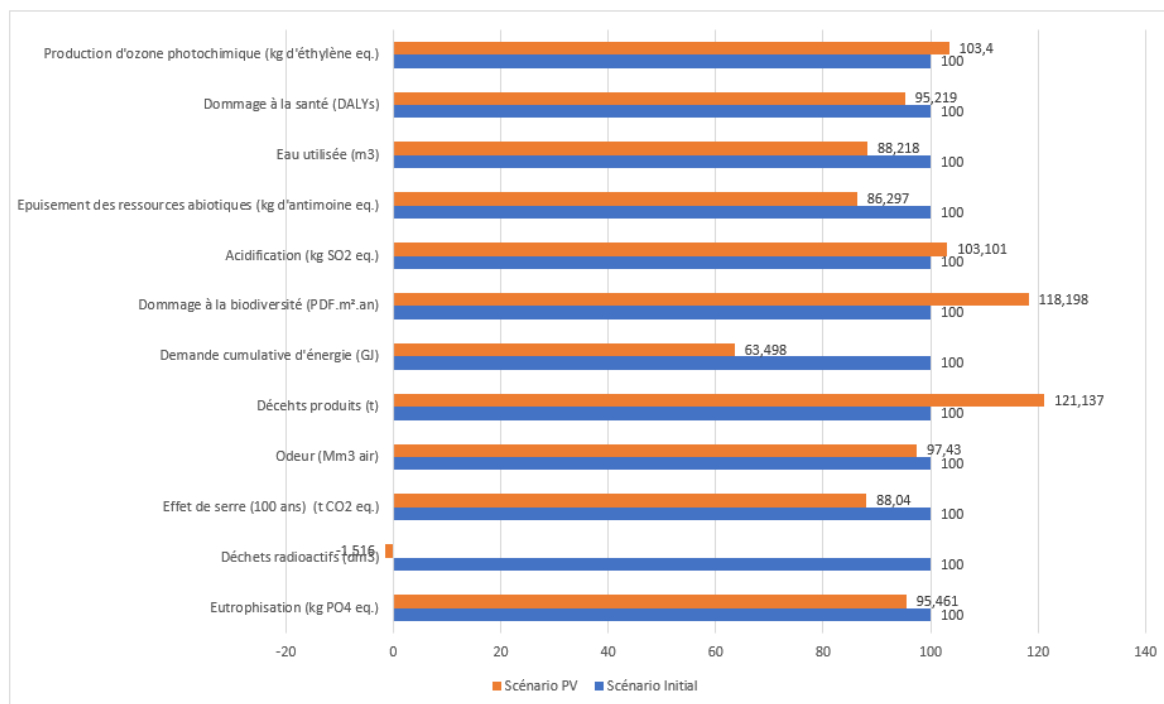


Figure 19 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios « initial » et « Photovoltaïques » (unité fonctionnelle : quartier entier)

De toutes les configurations étudiées, celle comprenant l'ajout de panneaux photovoltaïques est celle qui produit les résultats les plus hétérogènes sur l'ACV du quartier. En effet, certains indicateurs sont fortement réduits alors que d'autres voient leur score augmenter considérablement.

L'impact le plus affecté est la production de déchets radioactifs. Sur l'ensemble du cycle de vie, la production de déchets radioactifs est réduite de 102%. En effet, même si cette production de déchets augmente lors de la phase de construction (9%) et de rénovation (1893%) du fait de l'impact de la fabrication des panneaux, la phase d'utilisation rattrape nettement ce retard. L'augmentation énorme du score de la phase d'utilisation s'explique par le fait que les panneaux sont changés tous les 20 ans et que dans le scénario précédent, la production de déchets radioactifs de cette phase était insignifiante. Cela dit, la production de déchets radioactifs durant la phase d'utilisation diminue de 127%. Cela s'explique par le fait que la production est supérieure à la consommation. En conséquence, non seulement la construction et la maintenance du système sont compensées, mais la production de déchets radioactifs de la phase d'utilisation est également éliminée. Et de plus, cela permet à d'autres logements de bénéficier de l'énergie propre produite. Ainsi, notre quartier permet de réduire la production de déchets radioactifs d'autres quartier, ce qui donne un score négatif pour cet indicateur.

Le deuxième indicateur le plus impacté est la demande cumulative d'énergie. L'énergie totale nécessaire au quartier pour fonctionner sur tout son cycle de vie est réduite de 37%. Encore une fois, les phases de construction et de rénovation sont impactées négativement. La phase de construction voit sa consommation d'énergie augmenter de 75% et la phase de rénovation de 978%, du fait de la fabrication des panneaux. Cependant, la phase d'occupation voit sa demande diminuer de 47%.

L'épuisement des ressources abiotiques et l'effet de serre diminuent également respectivement de 14% et de 12% sur l'ensemble du cycle de vie. L'évolution des indicateurs suit encore une fois le même schéma, à savoir une augmentation importante sur les phases de construction et de rénovation. Cependant encore une fois ces augmentations sont compensées par une baisse de l'impact environnemental de la phase d'utilisation, phase la plus impactante du cycle de vie. Nous observons une baisse de 25% des émissions de gaz à effet de serre sur cette phase et une baisse de 26% de l'épuisement des ressources abiotiques.

A l'inverse, certains indicateurs voient leur score augmenter. C'est le cas de la production de déchets. La phase de rénovation voit sa production de déchets augmenter de 742%. En effet, il faut remplacer les 4400m² de surface de panneaux trois fois sur le cycle de vie du quartier et en plus inclure leur installation initiale. La baisse de 15% de la production de déchets durant la phase d'utilisation ne comble pas cette augmentation. Ainsi, la production totale de déchets du quartier sur l'ensemble de son cycle de vie croît de 21%.

Enfin, paradoxalement, les dommages faits à la biodiversité augmentent également. C'est encore une fois la fabrication et le remplacement des panneaux qui est en cause. L'impact de la phase de construction augmente de 229% et celui de la phase de rénovation de 849%. La baisse de l'impact de 6% durant la phase d'utilisation ne comble pas ces pertes. Ainsi sur l'ensemble du cycle, les dommages faits à la biodiversité augmentent de 18%.

Pour conclure, l'installation de panneaux photovoltaïques a un bilan mitigé. Il faut cependant prendre en compte le fait que nous avons fortement surdimensionné l'installation dans notre cas. Cela-dit, c'est un choix qui peut être pris afin de générer des entrées financières via la revente de l'électricité en surplus. Nous remarquons que la fabrication de tels panneaux n'est pas neutre d'impacts environnementaux. Si sur certains points (production de déchets radioactifs, épuisement des ressources abiotiques, effet de serre ou demande cumulative d'énergie) les économies faites durant la phase d'utilisation surpassent largement les impacts de la fabrication, cela n'est pas le cas pour d'autres (production de déchets, dommage à la biodiversité).

Chapitre 11: Comparaison des différents scénarios

Dans cette dernière partie, nous allons réunir, sur un même graphique, les résultats de tous les scénarios étudiés. Cela nous permettra de les comparer et ainsi de définir les paramètres de conceptions les plus impactant.

Afin de classer les différents scénarios entre eux et ainsi de définir les paramètres de conception à prendre en compte en priorité, nous effectuons la somme des variations, en pourcentage, de tous les indicateurs par rapport au scénario initial. Nous choisissons de n'appliquer aucune pondération mais de supprimer l'indicateur « odeurs » qui fausse les résultats de par ses variations trop importantes.

	Eutrophisation (kg PO4 eq.)	Déchets radioactifs (dm3)	Effet de serre (100 ans) (t CO2 eq.)	Odeur (Mm3 air)	Déchets produits (t)	Demande cumulative d'énergie (GJ)	Domage à la biodiversité (PDF.m ² .an)	Acidification (kg SO2 eq.)	Epuisement des ressources abiotiques (kg d'antimoine eq.)	Eau utilisée (m3)	Domage à la santé (DALYs)	Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)
Quartier Initial	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Quartier "Orientation 90°"	99,92	99,963	99,04	99,735	99,978	99,327	99,961	99,786	99,012	99,99	99,705	99,607
Quartier "récupération des eaux de pluie"	68,449	98,733	97,105	99,694	92,933	98,508	95,772	95,384	98,076	85,675	95,749	97,438
Quartier "Perméable"	94,583	99,81	99,517	99,962	98,712	99,794	99,289	99,239	99,736	99,799	99,309	99,598
Quartier "Site Urbain"	82,969	85,201	60,093	86,471	93,793	72,14	77,449	65,462	66,492	96,196	67,709	49,955
Quartier "Densité Verticale"	87,964	86,774	88,605	88,319	86,142	86,566	87,943	84,894	74,245	86,815	86,409	81,003
Scénario PV	95,461	-1,516	88,04	97,43	121,137	63,498	118,198	103,101	86,297	88,218	95,219	103,4
Scénario "Densité horizontale"	90,099	97,32	100,717	78,867	101,448	102,466	102,272	100,893	103,282	105,282	101,88	104,343

Tableau 31 : Variations des indicateurs environnementaux de tous les scénarios étudiés par rapport au scénario initial (Unité fonctionnelle : occupant)

Voici les paramètres de conception classés suivant leur influence sur le bilan environnemental du quartier :

- 1- Mobilité : 282% de diminution cumulée sur tous les indicateurs
- 2- Densité Verticale : 163%
- 3- Energies Renouvelables : 138%
- 4- Récupération des eaux de pluie : 76%
- 5- Perméabilité des sols : 11%
- 6- Orientation : 4%
- 7- Densité Horizontale : -10%



Figure 20 : Histogramme comparatif des impacts environnementaux des différents scénarios étudiés. (Unité fonctionnelle : occupant)

Ainsi, selon notre étude et entre tous les paramètres étudiés, la gestion de la mobilité est le plus impactant. C'est le paramètre qui permet de faire diminuer le plus les impacts en termes d'effet de serre, d'odeurs, de dommages à la biodiversité et à la santé, d'acidification, d'épuisement des ressources abiotiques et de production d'ozone photochimique. Le recours journalier des habitants du quartier à un moyen de transport individuel a un impact énorme sur l'ACV du quartier. Eliminer l'usage des véhicules personnels au profit des transports en commun permet de limiter l'effet de serre de manière 4 fois plus importante que de générer toute l'électricité du quartier grâce à des panneaux photovoltaïques. Ainsi, la gestion de la mobilité doit être l'une des problématiques à traiter en priorité lors de toute réflexion menée à l'échelle urbaine. Concevoir un quartier se voulant durable et écologique tout en étant déconnecté des réseaux de transport en commun est un non-sens.

Nous retrouvons en deuxième position le critère de densité verticale. Augmenter la densité construite du quartier par élévation des bâtiments est environnementalement très bénéfique. Cela permet de mutualiser de nombreux flux, d'augmenter l'efficacité énergétique et environnementale du quartier et ainsi de minimiser de manière homogène les différents impacts environnementaux. Un écoquartier se doit donc de présenter une certaine densité. L'un des critères du référentiel quartier durable porte sur cet aspect et impose une densité de 30 à 40 logements par hectare.

Vient ensuite la mise en œuvre de systèmes de production d'énergie renouvelable. Nous avons mis en avant le fait que les systèmes de panneaux photovoltaïques affichent un bilan environnemental mitigé. Les utiliser est intéressant pour limiter la production de déchets radioactifs et la demande cumulative d'énergie. Cependant, leur fabrication impacte négativement l'ACV en termes de dommages à la biodiversité et de déchets produits. Ainsi, leur mise en œuvre à grande échelle ne semble pas forcément être une priorité, du moins pas tant que leurs processus de fabrication et de recyclage ne sont pas plus propres.

Intégrer des systèmes de récupération des eaux de pluies au quartier s'est révélé être fortement impactant sur les résultats de l'ACV, notamment en termes d'eutrophisation et d'eau utilisée. La gestion intelligente des eaux de pluie devrait être une des priorités lors de la conception d'un quartier.

Enfin, la perméabilité des sols et l'orientation sont des paramètres qui s'ils sont bien gérés améliorent le bilan environnemental d'un quartier mais en moindre mesure. Quant au choix de densifier horizontalement le quartier par l'ajout de plus de bâtiments, il peut s'avérer contre-productif.

Conclusion

Malgré la complexité et les limites de la méthode de l'ACV, cet outil s'est avéré correspondre parfaitement aux besoins de cette étude. Alors que la majorité des travaux portant sur l'ACV à l'échelle du bâtiment ne s'intéressent qu'à un nombre très limité d'indicateurs et souvent qu'à un seul paramètre, nous avons fait preuve d'ambition en étudiant plus de dix indicateurs et huit scénarios.

Ce large panel de paramètres étudiés nous a permis de dresser plusieurs constats intéressants. En premier lieu, la nécessité d'élargir la réflexion environnementale à l'échelle urbaine. La prédominance des impacts dû à la mobilité et à la gestion des déchets dans le bilan environnemental global du quartier en atteste. Nous avons montré que ces problématiques typiques du développement urbain sont à traiter en priorité étant donné leur influence considérable sur l'ACV d'un quartier déjà performant énergétiquement.

Au contraire, une fois ces problématiques urbaines prises en compte, les paramètres influant à l'échelle du bâtiment deviennent insignifiants. C'est le cas de l'orientation, qui comme nous l'avons observé, n'a que très peu d'impact sur l'ACV du quartier.

Concernant les paramètres de conception internes au quartier, certains s'avèrent plus impactant environnementalement que d'autres. La densité ou la gestion des eaux de pluie sont des paramètres à étudier minutieusement et à optimiser en priorité de par leur fort impact sur les performances environnementales du quartier. Nous avons montré qu'il est fortement préférable de densifier le quartier verticalement plutôt qu'horizontalement et que les systèmes de récupération des eaux pluviales étaient plus efficaces que les sols perméables. L'installation de panneaux photovoltaïques s'est avérée mitigée d'un point de vue durabilité.

Notre étude a porté sur les thématiques nous semblant les plus pertinentes à étudier en priorité. Cependant, de nombreux autres paramètres restent à étudier afin de pouvoir fournir aux concepteurs des lignes de conduites complètes. Ainsi, ce travail reste ouvert et sera complété dès l'an prochain par un second mémoire de fin d'étude.

Bibliographie

Allacker, K. (2010). *Sustainable building - the development of an evaluation method* (Doctoral dissertation). Katholieke Universiteit Leuven, Leuven.

Allacker, K., De Troyer, F., Trigaux, D., Geerken, T., Debacker, W., Spirinckx, C., Van Dessel, J., Janssen, A., Delem, L., & Putzeys K. (2011). *Sustainability, Financial and Quality evaluation of Dwelling types "SuFiQuaD", Final Report*. Research Programme Science for a Sustainable Development. Bruxelles : Belgian Science Policy.

Allacker, K., & Sala, S. (2014). Land use impact assessment in the construction sector: an analysis of LCIA models and case study application. *Life Cycle Assess.* , *19*, 1799–809. doi:10.1007/s11367-014-0781-7.

Anderson, J.E., Wulforth, G., & Lang, W. (2015). Energy analysis of the built environment - A review and outlook. *Renew. Sustain Energy Rev.*, *44*, 149-1581.

Blengini, G.-A. (2009a). Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: a case study in Turin. *Building and Environment*, *44*, 319–30.

Blengini, G.-A., & Di Carlo, T. (2009b). The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy and Buildings*, *42*, 869–80.

Börjesson, P., & Gustavsson, L. (2000). Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives. *Energy Policy*, *28*, 575-88.

Buyle, M., Braet, J., & Audenaert, A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector : a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *26*, 379-388. doi : 10.1016/j.rser.2013.05.011.

Cherqui, F. (2005). *Méthodologie d'évaluation d'un Projet d'aménagement Durable d'un Quartier, Méthode ADEQUA* (PhD dissertation). Université de La Rochelle, La Rochelle.

Chevalier, J. (2009). Analyse du cycle de vie, utilisation dans le secteur de la construction, *Techniques de l'ingénieur, NOG5 880*.

- Cole, R., & Kernan, P.-C. (1996). Life-cycle energy use in office buildings. *Building and Environment*, 31(4), 307–17.
- Colombert, M., De Chastenet, C., Diab, Y., Gobin, C., Herfray, G., Jarrin, T., & Trocmé, M. (2011). Analyse de 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). *Environnement Urbain/Urban Environment*, 5, c1–c21.
- Comité européen de normalisation. (2011). EN 15978. *Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul*. Bruxelles, Belgique.
- Comité européen de normalisation. (2012). EN 15804. *Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction*. Bruxelles, Belgique.
- Cuéllar-Franca, R.-M., & Azapagic, A. (2012). Environmental impacts of the UK residential sector: life cycle assessment of houses. *Building and Environment*, 54, 86–99.
- Davila, C.C., & Reinhart, C. (2013). Urban energy lifecycle : An analytical framework to evaluate the embodied energy use of urban developments. In *Proc. BS2013 13th Conf. Int. Build. Perform. Simul. Assoc.*, 26-28, 1280-1287. Chambery.
- Desjardins, M.-C. (2007). *Les possibilités et les limites de l'“ analyse du cycle de vie” pour un droit de l'environnement plus cohérent et efficace* (PhD Thesis). Université Laval, Laval.
- Erlandsson, M., & Levin, P. (2005). Environmental assessment of rebuilding and possible performance improvements effect on a national scale. *Building and Environment*, 40(11), 1459–71.
- European Commission. (2011). *Roadmap to a Resource Efficient Europe*.
- European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability. (2014). *ILCD handbook: general guide to life cycle assessment-detailed guidance*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- European Environment Agency. (2006). *Urban sprawl in Europe, the ignored challenge*. Copenhagen.
- European Parliament. (2003). Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings. *Communities*, L(1), 65–71.

- Finnveden, G. (2000). On the limitations of life cycle assessment and environmental systems analysis tools in general. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(4), 229.
- Gerilla, G., Teknomo, K., & Hokao, K. (2007). An environmental assessment of wood and steel reinforced concrete housing construction. *Building and Environment*, 42(7), 2778–84.
- Gervasio, H., Santos, P., da Silva, L.-S., Vassart, O., Hettinger, A.-L., & Huet, V. (2014). *Large Valorisation on Sustainability of Steel Structures, Background Document*. Portugal. ISBN 978-80-01-05439-0.
- Guinee, J.-B., Udo De Haes, H.-A., & Huppes, G. (1993). Quantitative life cycle assessment of products: 1:goal definition and inventory. *Journal of Cleaner Production* 1(1), 3–13.
- Guinée, J.B., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A., Van de Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., De Bruijn, H., Van Duin, R., & Huijbregts, M.-A.-J. (2002). *Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. Ila: Guide. Iib: Operational annex. III: Scientific background*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. ISBN 1-4020-0228-9.
- Greening, L.-A., Greene, D.-L., & Difiglio, C. (2000). Energy efficiency and consumption—the rebound effect—a survey. *Energy Policy*, 28(6–7), 389–401.
- Heijungs, R., Guinée, J., Huppes, G., Lankreijer, R., Udo de Haes, H., Sleeswijk, A., Ansems, A., Egges, P., van Duin, R., & de Goede, H. (1992). *Environmental Life Cycle Assessment of products. Guide and Backgrounds* (CML). Université de Leiden, Leiden.
- Hennicke, P. (2004). Scenarios for a robust policy mix: the final report of the German study commission on sustainable energy supply. *Energ Policy*, 32, 1673-8.
- Herfray, G., Vorger, E., & Peuportier, B. (2011). Life Cycle Assessment Applied to Urban Settlements and Urban Morphology Studies. *Build. From Nano to urban scale, CISBAT 11 Cleantech Sustain*. Lausanne.
- Herfray, G. (2011) Contribution à l'évaluation des impacts environnementaux des quartiers (PhD dissertation). Ecole supérieure Nationale des Mines de Paris, Paris.
- Huberman, N., & Pearlmutter, D. (2008). A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. *Energy and Buildings*, 40(5), 837–48.
- International Energy Agency. (2005). *Energy related environmental impact of buildings, technical synthesis report annex 31: International energy agency buildings and*

community systems. FaberMaunsell Ltd. Retrieved 06/2010 from http://www.ecbcs.org/docs/annex_31_tsr_web.pdf.

International Energy Agency. (2011) *World Energy Outlook 2011*.

ISO (international Standardization Organization). (2006a). International Standard ISO 14040. *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*.

ISO (international Standardization Organization). (2006b). International Standard ISO 14044. *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*.

Loiseau, E., Junqua, G., Roux P., & Bellon-Maurel, V. (2012). Environmental assessment of a territory: an overview of existing tools and methods. *Environ. Manage* 112, 213-225. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.07.024>.

Libération. (2009). *La prise de conscience environnementale*. Retrieved 03/2018 from http://www.liberation.fr/terre/2009/11/30/de-1970-a-2009-histoire-d-une-prise-de-conscience_596573.

Lotteau, M., Loubet, P., Pousse, M., Dufrasnes, E., & Sonnemann, G. (2015a). Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale. *Building and Environment*, 93, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.029>

Lotteau, M., Yopez-Salmon, G., & Salmon, N. (2015b). Environmental Assessment of Sustainable Neighborhood Projects through NEST, a Decision Support Tool for Early Stage Urban Planning. *Procedia Engineering*, 115, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.356>

Marrero, G. (2010). Greenhouse gases emissions, growth and the energy mix in Europe. *Energy Econ.* 32(13), 56-63.

Menet, J.-L. & Gruescu, I.-C. (2014). A comparative life cycle assessment of exterior walls constructed using natural insulation materials. *Environmental Engineering and Sustainable Development Entrepreneurship*, 1(4). HAL ID : hal-00952027.

Metz, B., Davidson, O., Bosch, P., Dave, R., & Meyer, L. (2007). *Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Nations Unies. (2004). Why take a life cycle approach?. *Programme des Nations Unies pour l'Environnement. Publication des Nations Unies*. ISBN: 92-807-24500-9

Nations Unies. (2013). *Population, Development and the Environment*.

- Nichols, B.G., & Kockelman, K.M. (2014). Life-cycle energy implications of different residential settings: recognizing buildings, travel, and public infrastructure, *Energy Policy* 68, 232-242.
- Norman, J., Maclean, H.L., Asce, M., & Kennedy, C.A. (2006). Comparing high and low residential density : life-cycle analysis of energy use and greenhouse gas emissions. *J. Urban Plan. Dev.*, 10-21.
- Oliver-Sol, J., Josa, A., Arena, A.P., Gabarrell, X., & Rieradevall, J. (2011). The GWP-Chart: an environmental tool for guiding urban planning processes. Application to concrete sidewalks, *Cities* 28, 245-250.
- Ortiz-Rodríguez, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2010). Life cycle assessment of two dwellings: one in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development. *The Science of the Total Environment* ,408(12), 2435–43.
- Peuportier, B., Popovici, E., & Troccmé, M. (2006). Analyse du cycle de vie à l'échelle du quartier, bilan et perspectives du projet ADEQUA. *Build. Environ.* 2013.03.017.
- Popovici, E. (2006). *Contribution à l'analyse de cycle de vie des quartiers* (PhD dissertation) Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris, Paris.
- Reap, J., Roman, F., Duncan, S., & Bras, B. (2008). A survey of unresolved problems in life cycle assessment: Part 1: goal and scope and inventory analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(4), 290–300. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0008-x>
- Reap, J., Roman, F., Duncan, S., & Bras, B. (2008). A survey of unresolved problems in life cycle assessment: Part 2: impact assessment and interpretation. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(5), 374-388. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0009-9>
- Reiter, S. (2010). Life cycle assessment of buildings - a review. In *Arcelor-Mittal International Network in Steel Construction, Sustainable Workshop and Third Plenary Meeting*. Bruxelles.
- Riera Perez, M.G., & Rey, E. (2013). A multi-criteria approach to compare urban renewal scenarios for an existing neighborhood. Case study in Lausanne (Switzerland). *Build. Environ.* 65, 58e70.

- Rossi, B., Marique, A.-F., Glaumann, M., & Reiter, S. (2012). Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool. *Building and Environment*, 51, 395–401. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.017>
- Rossi, B., Marique, A.-F., & Reiter, S. (2012). Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, case study. *Building and Environment*, 51, 402–407. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.002>
- Salomon, T., Mikolasek, R., & Peuportier, B. (2005). Outil de simulation thermique du bâtiment, COMFIE , from *Journée SFT-IBPSA, Outils de simulation thermo-aéraulique du bâtiment*, La Rochelle, 8 p.
- Servaes, R., Allacker, K., Debacker, W., Delem, L., De Nocker, L., De Troyer, F., Janssen, A., Peeters, K., Spirinckx, C., & Van Dessel, J. (2013). *Profil environnemental des éléments de construction*. OVAM, Malines.
- Service Public de Wallonie. (2018) *Performance énergétique des bâtiments*. Retrieved from: <http://energie.wallonie.be>
- Setac. (2003). *Life-cycle assessment in building and construction: a state-of-the-art report*. ISBN: 978-1-880611-59-3
- Simonen, K. (2014). Life cycle assessment. *Pocket Architecture : Technical Design Series*. Routledge, London and New York.
- Stephan, A., Crawford, R.H., & de Myttenaere, K. (2013). Multi-scale life cycle energy analysis of a low-density suburban neighbourhood in Melbourne, Australia. *Build. Environ.* 68, 35-49.
- Thormark, C. (2000). Environmental analysis of a building with reused building materials. *The International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings*, 1.
- Trigaux, D., Allacker, K., & De Troyer, F. (2014). *Model for the Environmental Impact Assessment of Neighbourhoods*.
- Trigaux, D., Oosterbosch, B., De Troyer, F., & Allacker, K. (2017). A design tool to assess the heating energy demand and the associated financial and environmental impact in neighbourhoods. *Energy and Buildings*, 152, 516–523. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.057>
- Trigaux, D., Allacker, K., & De Troyer, F. (2017). Life Cycle Assessment of Land Use in Neighborhoods. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 595–602. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.133>

Wolf, M.-A., Pant, R., Chomkhamsri, K., Sala, S., & Pennington, D. (2012) *The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) handbook*. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability.

Table des Figures

Figure 1: Etapes de l'ACV selon l'ISO 14044 (ISO, 2006b)	10
Figure 2: Phases du cycle de vie du bâtiment selon la norme EN 15978 (CEN, 2011a)	20
Figure 3: Etapes du cycle de vie du quartier et contributions associées à l'échelle du bâtiment et du quartier (Lotteau et al., 2015a)	41
Figure 4 : Localisation du quartier d'étude	49
Figure 5 : Plan masse (source : http://www.thomas-piron.eu/minisitesflash/angleur/projet.php#)	49
Figure 6: Chainage des logiciels d'analyse	53
Figure 7 : Vue du modèle 3D du quartier tel que présenté dans le logiciel Pléiades (les ouvertures n'apparaissent que sur le bâtiment sélectionné)	59
Figure 8 : Primary energy consumption and climate change ; min, Q1, median, Q3 and max values (Lotteau et al., 2015a)	71
Figure 9 : Comparaison des impacts environnementaux des scénarios « orientation 0° » et « orientation 90° » (unité fonctionnelle : quartier entier)	76
Figure 10 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios avec et sans systèmes de récupération des eaux de pluie (unité fonctionnelle : quartier entier)	80
Figure 11 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios avec et sans revêtements de sols perméables (unité fonctionnelle : quartier entier)	81
Figure 12 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios initial, avec et sans revêtements de sols perméables (unité fonctionnelle : quartier entier)	82
Figure 13 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios de mobilité (unité fonctionnelle : quartier entier)	84
Figure 14 : Vue du modèle 3D du quartier dans la configuration « densité + » tel que présenté dans le logiciel Pléiades (les ouvertures n'apparaissent que sur le bâtiment sélectionné)	86
Figure 15 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios « initial » et « densité + » (unité fonctionnelle : quartier entier)	88
Figure 16 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios « initial » et « Densité Verticale » (unité fonctionnelle : occupant)	89
Figure 17 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios « initial » et « Densité Horizontale » (unité fonctionnelle : occupant)	90

Figure 18 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios « initial », « Densité Horizontale » et « Densité Verticale » (unité fonctionnelle : occupant).....	91
Figure 19 : Diagramme comparatif des impacts environnementaux des scénarios « initial » et « Photovoltaïques » (unité fonctionnelle : quartier entier).....	93
Figure 20 : Histogramme comparatif des impacts environnementaux des différents scénarios étudiés. (Unité fonctionnelle : occupant)	96

Liste des Tableaux

Tableau 1: Indicateurs d'impact environnementaux tels que spécifiés dans la norme EN15978 (CEN,2011a)	13
Tableau 2: Indicateurs d'impact environnementaux tel que spécifié dans la norme EN15978 (CEN,2011a)	22
Tableau 3: Tableau du GWP pour un intervalle de temps donné (en kg <i>CO2</i> éq./kg) (GIEC,2007)	23
Tableau 4: ODP de certains gaz (kg CFC-11 éq./kg) (Heijungs et al., 1999).....	24
Tableau 5: PA de certains gaz (kg d'éq. <i>SO2</i>) (Huijbregts, 2001)	24
Tableau 6: potentiels d'eutrophisation de certaines substances (kg d'éq. <i>PO42</i> –) (Heijungs et al., 1999)	25
Tableau 7: POCP de certaines substances pour deux concentrations en NOx (kg <i>C2H4</i> éq./kg) (Heijungs et al., 1999).....	26
Tableau 8: Potentiel d'épuisement abiotique (en éq. Sb/kg) (Guinée et al., 2002)	27
Tableau 9: Indicateurs d'écotoxicité en <i>m3</i> d'eau ou en kg de sol pollué selon l'agence américaine de protection de l'environnement (EPA) (Peuportier et Polster, n.d.).....	29
Tableau 10: Indicateurs de toxicité humaine (Peuportier et Polster, n.d.)	30
Tableau 11 : Valeurs NDP de différents types d'utilisation de terrain	30
Tableau 12: Indicateurs d'utilisation des ressources tel que spécifié dans la norme EN15978 (CEN, 2011a)	32
Tableau 13: Indicateurs relatifs aux déchets tel que spécifié dans la norme EN 15978 (CEN, 2011a).....	32
Tableau 14: Indicateurs relatifs aux flux sortants tel que spécifié dans la norme EN 15978 (CEN, 2011a).....	32
Tableau 15 : Composition des parois.....	56
Tableau 16 : Etats de surfaces des parois.....	56
Tableau 17 : Caractéristiques des menuiseries	57
Tableau 18 : Pont thermiques	57
Tableau 19 : Température de consigne des zones thermiques hébergeant les pièces de vie (°C).....	60
Tableau 20 : Températures de consigne des zones thermiques hébergeant les pièces de nuit (°C)	60
Tableau 21 : Puissances dissipées à l'intérieur du bâtiment (W/m ²).....	61
Tableau 22 : Pourcentage d'occupation des pièces de vie (% d'occupants)	62

Tableau 23 : Pourcentage d'occupation de la zone nuit (% d'occupants).....	62
Tableau 24 : Besoins de chauffage respectifs des différents bâtiments du quartier.....	64
Tableau 25 : Résultats de l'ACV du bâtiment A3 en termes d'impacts calculés.....	68
Tableau 26 : Résultats de l'ACV à l'échelle du quartier (cas initial)	70
Tableau 27 : Résultats détaillés du calcul de l'impact « effet de serre » à l'échelle du quartier (cas initial).....	72
Tableau 28 : Résultats détaillés du calcul de l'impact « demande cumulative d'énergie » à l'échelle du quartier (cas initial).....	73
Tableau 29 : Résultats de la STD des différents bâtiments du quartier pour différentes orientations.....	75
Tableau 30 : Besoins de chauffage des différents bâtiments du quartier dans la configuration de base et élevés d'un étage.....	87
Tableau 31 : Variations des indicateurs environnementaux de tous les scénarios étudiés par rapport au scénario initial (Unité fonctionnelle : occupant)	95

Annexes :

Les annexes sont consultables sur la version numérique du mémoire disponible en téléchargement sur le site matheo.uliege.be.