

Analyse du cycle de vie de la rénovation d'un quartier dans plusieurs pays européens

Auteur : Karatas, Esra

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 : 2018-2019

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/7985>

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.

ANALYSE DU CYCLE DE VIE DE LA RÉNOVATION D'UN QUARTIER DANS PLUSIEURS PAYS EUROPÉENS



Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de
Master Ingénieur Civil Architecte par Esra KARATAS

Année académique 2018 | 2019

Promotrice : Sigrid REITER

Composition du jury : Shady ATTIA, Jean-Marie HAUGLUSTAINÉ,
Modeste KAMENI NEMATCHOUA

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord chaleureusement remercier Madame Sigrid REITER, promotrice de mon travail, pour son intérêt, sa confiance, sa disponibilité, sa motivation et ses conseils avisés.

Je remercie également Monsieur Jean-Marie HAUGLUSTAINE, Monsieur Shady ATTIA ainsi que Monsieur Modeste KAMENI NEMATCHOUA, membres de mon jury, pour l'intérêt et le temps qu'ils m'ont consacré.

Je remercie spécialement Matthieu Sevin, son mémoire m'a servi de base et a facilité mon travail.

Ensuite, je remercie toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de mon travail que ce soit en partageant des données, leurs opinions ou encore pour le temps qu'ils ont accordé à la relecture.

Enfin, je souhaite remercier ma famille, mes amis et mes proches pour leur soutien, leurs encouragements, leur patience et leur confiance qu'ils m'ont accordé pour ce travail mais aussi pour toutes ces années.

RÉSUMÉ

Dans tous les pays du monde, le secteur de la construction témoigne du niveau socio-économique du pays. Ce secteur occupe donc une grande place. Or il se trouve que le secteur du bâtiment est un des plus gros consommateurs de ressources naturelles et une source importante de dégradation de l'environnement.

Ainsi, à l'heure où la situation climatique est critique et que les citoyens sont sensibilisés à la cause environnementale, les politiques ont bien compris l'enjeu du 21^{ème} siècle. En effet, au sein de l'Union Européenne par exemple, de nouvelles réglementations visant à réduire les impacts environnementaux entrent régulièrement en vigueur. Cela reste encore aujourd'hui très insuffisant puisque ces mesures restent ciblées sur l'utilisation des énergies, les émissions de gaz à effet de serre et celles générées pendant la phase d'utilisation pour la plupart.

Ainsi, le but de ce TFE est d'étendre cette sensibilité à toutes les étapes de l'ACV et ce, sur plusieurs paramètres influant en plus de la consommation d'énergie et l'émission des gaz à effet de serre.

En effet, en partant non plus de l'échelle d'un bâtiment mais d'un quartier, bien plus significatif, plusieurs scénarios de rénovation seront appliqués afin de déterminer les paramètres ayant le plus fort impact. Nous décidons de réaliser ces simulations dans quatre villes européennes situés dans quatre zones climatiques différentes afin d'analyser l'impact du climat également. A terme, l'idée serait de servir de base pour prioriser certains travaux de rénovation plutôt que d'autres.

L'étude porte sur l'étude de l'impact du climat, d'une rénovation légère puis d'une rénovation lourde, du mix énergétique, de l'augmentation de taux d'énergie renouvelable dans le mix énergétique, la gestion des eaux, l'installation des panneaux solaires photovoltaïques et la mobilité.

Nous avons alors mis en avant que le climat influe sur plusieurs des indicateurs étudiés mais ceci est principalement dû aux besoins de chauffage qui engendrent une consommation d'énergie qui elle génère des dommages à l'environnement. Dès lors, les climats les plus chauds sont ceux qui génère le moins de dommages à l'environnement.

Ensuite, concernant les scénarios étudiés, le plus influent concernait l'isolation des parois et le remplacement des châssis puis l'utilisation des énergies de sources plus propres.

T ABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	2
RÉSUMÉ	3
TABLE DES MATIERES	4
PARTIE 1 INTRODUCTION	6
1.1. Un des enjeux du 21eme siècle, la préservation de l'environnement	6
1.2. Secteur du bâtiment	9
1.3. Le choix de l'analyse du cycle de vie	10
1.3. Objectif de ce TFE	11
1.4. Structure du mémoire	11
PARTIE 2 ÉTAT DE L'ART	13
2.1. Définition	13
2.2. Méthode de l'ACV	13
2.2.1. Définition des objectifs et du champ de l'étude	14
2.2.2. Inventaire	15
2.2.3. Evaluation de l'impact	15
2.2.4. Interprétation	16
2.2.5. Limites	17
2.3. ACV à l'échelle du quartier	18
2.3.1. La méthode	19
2.3.1.1. Objectif et champ d'application	19
2.3.1.2. Inventaire du cycle de vie	22
2.3.1.3. Évaluation de l'impact	23
2.4. Limites de la méthode	23
2.5. Résultats issus de l'état de l'art	25
PARTIE 3 METHODOLOGIE	28
3.1 Pays d'étude	28
3.2 Quartier d'étude	30
3.2.1. Le quartier	30
3.2.2 Le programme	31
3.3. Hypothèses concernant l'ACV	31
3.3.1 Objectifs et champ d'application	31
3.3.2. Unité fonctionnelle	32
3.3.3. Frontières du système	32
3.4. Données	32
3.5. Indicateurs environnementaux	33
3.6. Outils	34
3.7. Scénarios	36
PARTIE 4 MODELISATION DU QUARTIER ET ANALYSE THERMIQUE DYNAMIQUE	37
4.1. Données de construction	37
4.1.1. Parois	37
4.1.2. Menuiseries	39

4.1.3. Ponts thermiques	39
4.1.4. Données météorologiques	39
4.2 Modélisation	40
4.3 Données simulation thermique.....	40
4.3.1. Température de consigne de chauffage	40
4.3.2 Puissances dissipées (W/m ²)	41
4.3.3 Pourcentage d'occupation	41
4.3.4 Chauffage	42
4.3.5 Ventilation	42
4.4 Vérification des premiers résultats de la simulation thermique dynamique.....	42
PARTIE 5 SIMULATIONS – ACV	43
5.1. Données générales concernant le projet	43
5.1.1. Bâtiment	43
5.1.2 Quartier	46
PARTIE 6 IMPACT DU CLIMAT.....	51
6.1 Analyse de la STD	51
6.2 Analyse de l'ACV	52
PARTIE 7 IMPACT DE LA RENOVATION	54
7.1. Remplacement des châssis	54
7.2. Isolation des parois	57
7.3. Combinaison des deux scénarios de rénovation	60
7.3.1. Analyse de la STD	60
7.3.2. Analyse de l'ACV.....	61
PARTIE 8 IMPACT DU MIX ENERGETIQUE	63
8.1. Modification du mix énergétique pour chaque pays	63
8.1.1 Analyse de l'ACV.....	64
8.2. Augmentation du taux d'énergie renouvelable.....	65
8.2.1 Analyse de l'ACV.....	66
PARTIE 10 IMPACT DE LA GESTION DES EAUX.....	69
10.1 Sol perméable	69
10.2 Récupération eau de pluie	71
10.3 Combinaison des deux scénarios.....	73
PARTIE 12 IMPACT DE L'INSTALLATION DE PANNEAUX SOLAIRES	76
12.1 Analyse de la STD	76
12.2 Analyse de l'ACV.....	76
PARTIE 14 IMPACT DE LA MOBILITE	80
14.1 Analyse de l'ACV.....	80
PARTIE 16 COMPARAISON DES SCENARIOS	83
PARTIE 17 CONCLUSION.....	92
BIBLIOGRAPHIE	94
TABLE DES FIGURES	98
TABLE DES TABLEAUX.....	100
ANNEXES.....	101

PARTIE 1 | INTRODUCTION

S'abriter fait partie d'un des besoins fondamentaux de l'Homme. Par conséquent, l'architecture qui répond à ce besoin, existe aussi depuis bien longtemps. Cependant, l'Homme a évolué et la Terre compte aujourd'hui 7,7 milliards d'habitants selon l'institut National d'Études Démographiques. Afin d'accueillir les nouvelles populations, le phénomène d'étalement urbain s'est répandu à travers le monde. Or avec la prise de conscience environnementale depuis les années 70, l'Homme cherche à diminuer son impact nocif sur l'environnement.

En effet, des réglementations visant à protéger l'environnement ont été adoptées, des méthodes de conception plus durables ont été créées. Afin d'éviter l'étalement urbain, et donc la dégradation de l'environnement, une politique de densification des villes s'est instaurée. Or le parc immobilier urbain est ancien et ne respecte plus, pour la plupart, les réglementations thermiques actuellement en vigueur. Par ailleurs, détruire pour reconstruire soulève aussi beaucoup de problématiques environnementales et financières. Finalement, la rénovation semble être un bon compromis.

1.1. Un des enjeux du 21eme siècle, la préservation de l'environnement

La fin des Trente Glorieuses (1946-1975) où la majorité des pays développés avait eu une période de forte croissance économique et où les conditions de vies s'étaient améliorées à l'issue de la Seconde Guerre Mondiale, coïncide avec le premier choc pétrolier mondial (1973) et l'émergence du chômage de masse. Cette période, début des années 1970, fait naître une prise de conscience environnementale à l'échelle internationale (Démoutiez, 2009).

En effet, Gaylord Nelson, sénateur américain originaire du Wisconsin, crée le « Earth Day ». Témoin des ravages causés par la marée noire à Santa Barbara, en Californie (1969) et inspiré par le mouvement étudiant anti-guerre (Vietnam), il a ramené à l'ordre du jour les problématiques environnementales.

Ainsi, le 22 avril 1970, 20 millions d'Américains sont descendus dans les rues, les parcs et les auditoriums pour manifester en faveur d'un environnement sain et durable. Des groupes indépendants qui luttait contre les marées noires, les usines et centrales polluantes, les eaux usées non traitées, les décharges toxiques, les pesticides, les autoroutes, la perte de la nature et l'extinction de la faune se sont retrouvés alors sous un même toit. Ce mouvement a abouti à la création de la fameuse « Environmental

Protection Agency » (EPA) des Etats-Unis et à l'adoption des lois sur la qualité de l'air, sur la qualité de l'eau et sur les espèces menacées d'extinction.

Un an après, deux des plus grandes organisations non gouvernementales agissant pour la protection de l'environnement, le World Wide Fund (WWF) et Greenpeace sont créées. En 1972, sous l'autorité de la prestigieuse Massachusetts Institute of Technology le Club de Rome publie son rapport annonçant l'épuisement des réserves non renouvelables mondiales pour les années 1990 dues au développement et à la croissance des grandes puissances mondiales. En juin de cette année a lieu la conférence de Stockholm, les Nations Unis consacrent pour la première fois une conférence aux questions écologiques et crée un programme coordonnant les actions pour la protection de l'environnement (Démoutiez, 2009).

C'est le 4 août 1987 que le terme « développement durable » est entendu pour la première fois à l'Assemblée générale de l'ONU lors de la présentation du rapport Brundtland.

En 1988 est créé le groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) sous l'égide des Nations Unies. Des scientifiques internationaux collaborent, leurs conclusions ont aujourd'hui une certaine autorité.

Le Sommet de la Terre de Rio a lieu en juin 1992. Il est considéré comme une grande réussite puisque plusieurs engagements ont été pris à ce moment-là. En effet, la Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement est adoptée ; elle dicte le principe de précaution en matière d'environnement et le principe du pollueur payeur. Par ailleurs, l'Agenda 21, pour le 21^{ème} siècle, liste les 2 500 recommandations d'action.

En décembre 1997, le protocole de Kyoto ratifié par 55 pays représentant 55% des émissions de CO₂, est considéré comme le premier traité adopté luttant contre les changements climatiques. Les signataires doivent réduire leurs émissions de gaz à effet de serre de 5,2% en moyenne jusqu'en 2012 par rapport au niveau de 1990 (Libération, 2009).

L'impact des médias est non négligeable dans la prise de conscience environnementale internationale. En effet, les marées noires (Amoco Cadiz 1978, Exxon Valdez 1989, Prestige 2002), Tchernobyl (1986), les activités industrielles (catastrophe de Bhopal, 1984), l'ouragan Katrina (2005) ou encore la canicule de 2003 en France qui a provoqué la mort de 15 000 personnes ont profondément marqué les esprits.

Arrivé au 21^{ème} siècle, la prise de conscience est présente mais les comportements restent inchangés. Cette prise de conscience est largement due aux actions du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) est non négligeable qui obtient le prix Nobel de la Paix en 2007. Le GIEC déclare cette année que l'homme est responsable à 90% de l'aggravation de l'effet de serre et que ceci conduirait à l'augmentation

des températures (entre 1,8°C et 4°C) et de la montée du niveau des océans (entre 28 et 42 cm). Il dénonce également une multiplication des phénomènes naturels extrêmes tels que les canicules, les sécheresses, les cyclones, etc... (Démoutiez, 2009).

L'Union Européenne, de son côté, se fixe des objectifs pour changer les comportements également. En effet, la Commission européenne s'est fixée des objectifs pour l'horizon 2020, 2030 et 2050.

Le « paquet 2020 » qui contient un ensemble de lois contraignantes, vise trois objectifs principaux :

- Emissions de gaz à effet de serre réduits de 20% (par rapport aux niveaux de 1990)
- 20% de l'énergie de l'UE issue d'énergies renouvelables
- Amélioration de 20% de l'efficacité énergétique (Commission Européenne, 2007).

Pour 2030, les ambitions sont bien évidemment plus élevées :

- Emissions des gaz à effet de serre réduit de 40% (par rapport aux niveaux de 1990)
- 32% de l'énergie de l'UE issue d'énergies renouvelables
- Amélioration de 32,5% de l'efficacité énergétique (Conseil Européen 2014).

Pour 2050, l'objectif est très intéressant puisqu'il fixe une Europe climatiquement neutre. Pour cela, l'Europe doit investir dans des solutions technologiques réalistes, en menant des actions sur des domaines clés tels que la politiques industrielle, la finance ou la recherche. Tout cela doit être fait en responsabilisant les citoyens, pour qu'ils se sentent concernés et passent à l'action. Bien entendu, toutes ces actions doivent être menées en garantissant l'équité sociale pour une transition plus juste.

Ainsi, la Commission Européenne est en conformité avec l'objectif de l'accord de Paris de maintenir la hausse de la température mondiale en dessous de 2°C.

Bien entendu pour atteindre tous ces objectifs, chaque Etat doit consentir, et adhérer à ces valeurs, ce qui n'est pas vraiment le cas. Alors que la poussée des Verts aux élections européennes avait fourni un élan d'espoir, les objectifs 2050 pour la neutralité carbone n'ont malheureusement pas été acceptés par chacun des pays membres lors du sommet européen ayant eu lieu les 20 et 21 juin derniers à Bruxelles, et donc ne figurent pas pour l'instant parmi les engagements de l'UE. En effet, dans des pays tels que la Pologne, la Hongrie, la République tchèque ou l'Estonie où la source d'énergie principale reste encore le charbon, l'adoption de ces objectifs imposeraient d'énormes charges sur leur industrie et leur économie (France24, 2019).

Finalement, pour atteindre les objectifs visés, plus que des réglementations, il faut responsabiliser tous les secteurs consommateurs d'énergie afin de les pousser à établir et respecter des plans d'actions par eux-mêmes. Parmi les 28 Etats membres, comme représenté sur la figure 1, le secteur de l'industrie consomme 25,3% de l'énergie finale, les ménages 25,4% et les transports 33,1% (Eurostat, 2015).

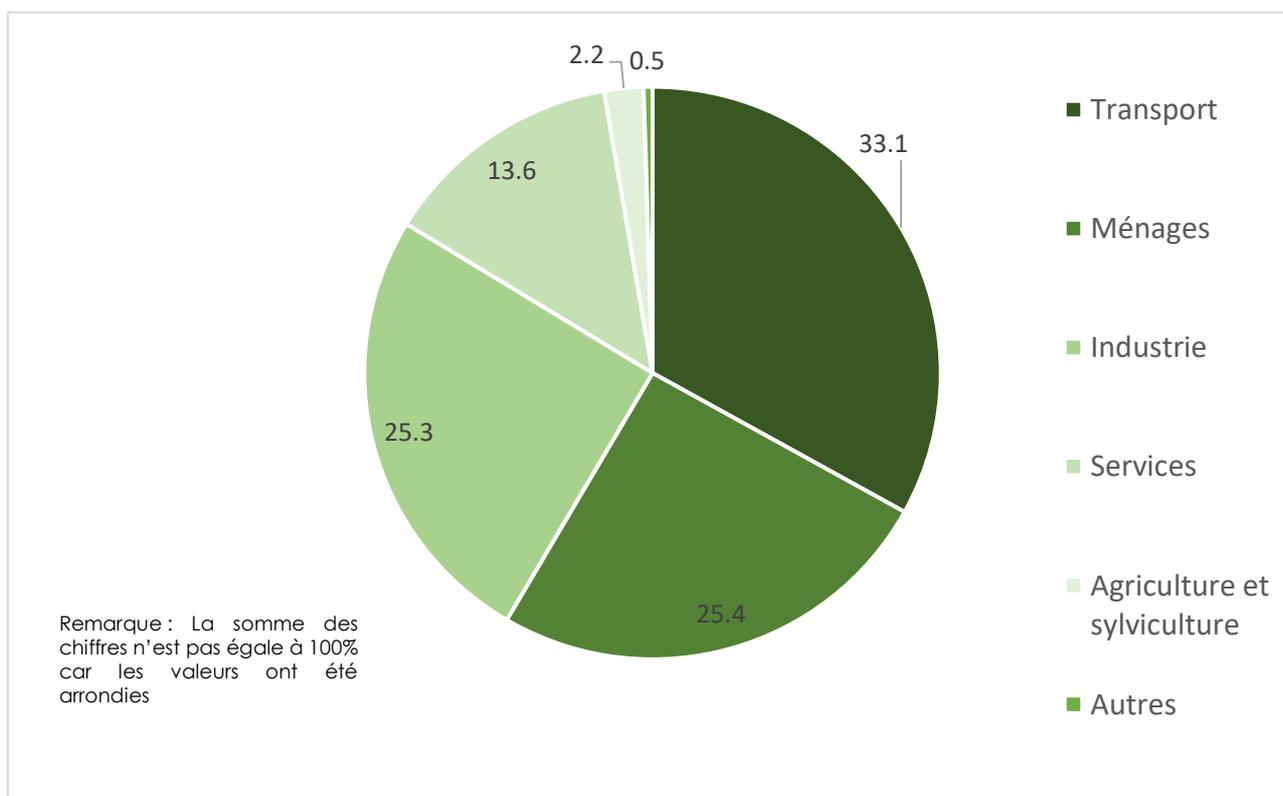


Figure 1 Consommation finale d'énergie des 28 Etats membres de l'UE, 2015 (en % du total sur la base des données en tonnes-équivalent pétrole)
 Source: Eurostat : https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_100a&lang=en

Ce classement et ces pourcentages étaient pourtant différents en 2007 où les transports avaient une part de la consommation d'énergie finale valant 31%, et l'industrie, 27%. Les ménages, le secteur du bâtiment arrivaient en tête (Commission Européenne, 2007). Nous pouvons expliquer ce changement du classement par les nouvelles réglementations thermiques de plus en plus contraignantes qui touchent le secteur du bâtiment contre l'augmentation de la fréquence des trajets aériens pour les voyages internationaux notamment par le développement des compagnies de vols low-cost telles que Ryanair, Eurowings, etc...

1.2. Secteur du bâtiment

Comme nous venons de le voir précédemment, le secteur du bâtiment est un des plus gros consommateurs d'énergies finales puisqu'il occupe la deuxième place dans le classement de 2015. Parallèlement, il est ainsi responsable d'énormes impacts environnementaux.

En effet, en 2011, 35% des émissions de gaz à effet de serre européens étaient dues aux bâtiments résidentiels et de service. Plus encore, d'ici 2050, 80% du parc constructif européen sera réalisé. Or les bâtiments sont responsables de la consommation spatiale des sols dans un premier temps mais aussi de la consommation physique des sols dû à l'extraction, la production, le transport et les traitements de fin de vie des produits de constructions (Allacker et al., 2014). C'est pourquoi la rénovation devient un enjeu crucial. En effet, selon le programme d'action européen de 2014/15, la rénovation des bâtiments permettrait d'économiser potentiellement plus de 17% de la consommation d'énergie primaire de l'union européenne en 2050 (Vilches et al., 2016).

Dès lors, afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre l'approche d'analyse du cycle de vie est nécessaire. L'analyse du cycle de vie qui sera détaillé dans les parties suivantes permet de quantifier l'impact environnemental d'un produit ou d'un service. (ISO 14040, 2006).

1.3. Le choix de l'analyse du cycle de vie

Plusieurs réglementations et ambitions européennes ont été mentionnées dans les parties précédentes. Cependant, il se trouve que la majorité d'entre elles sont destinées à augmenter la performance énergétique des bâtiments en diminuant leurs consommations lors de la phase d'occupation seulement.

Une curiosité née alors concernant l'impact des autres phases de l'analyse du cycle de vie ; sont-elles négligeables ? De plus, l'impact de la consommation énergétique est le plus mis en avant mais n'y en a-t-ils pas d'autres qui méritent d'être traités ? Par ailleurs, ne serait-il pas plus cohérent de faire des études à l'échelle urbaine puisque les enjeux environnementaux se traitent à cette échelle ?

Aux vues enjeux environnementaux actuels, le secteur du bâtiment recherche des solutions afin de diminuer son impact. Des méthodes statistiques, des simulateurs existent pour dresser le bilan environnemental d'une construction. L'ACV fait partie d'une des méthodes les plus abouties et les plus acceptées par la communauté puisqu'elle est même standardisée au niveau européen par des normes ISO. Depuis les 25 dernières années, elle est de plus en plus utilisée à l'échelle du bâtiment mais son utilisation à l'échelle du quartier est encore très récente (Lotteau et al., 2015).

Ainsi, s'inscrivant dans le contexte international d'aujourd'hui, et étant un avantage pour toute carrière dans le secteur du bâtiment, nous allons tester la méthode de l'ACV pour la rénovation d'un ancien quartier placé

dans plusieurs pays européens, en prenant en compte plusieurs paramètres. Un travail similaire a été réalisé en 2018 dans le cadre du travail de fin d'études par Matthieu Sevin. Lui, avait simulé un éco-quartier neuf, en Belgique seulement. Un autre, réalisé par Modeste Kameni et al., (2019b) réalise l'ACV de deux anciens quartiers situés en Belgique.

1.3. Objectif de ce TFE

Dans la continuité des réglementations européennes visant à réduire la consommation des ressources naturelles et l'émission des gaz à effet de serre en limitant les consommations énergétiques à l'échelle du bâtiment, nous élargissons la réflexion dans le cadre de ce travail de fin d'études en s'intéressant à la rénovation à l'échelle d'un quartier tout entier, en étudiant plusieurs paramètres sur toutes les étapes de l'analyse du cycle de vie et ce, dans plusieurs pays européens.

L'objectif de ce travail de fin d'études est donc d'étudier plusieurs paramètres à l'échelle d'un quartier afin d'évaluer leur impact environnemental lors d'une rénovation. Les paramètres étudiés seront détaillés dans des parties ultérieures mais de manière générale il s'agira d'étudier l'impact de la géolocalisation et par ce biais, l'impact du climat. Il s'agira également d'étudier différents scénarios de rénovation légères et lourdes, l'impact du mix énergétique, ou encore l'impact de l'activité des occupants.

Ainsi en quantifiant l'impact environnemental de ces paramètres, nous pourrons mettre en avant ceux générant une incidence importante sur la qualité environnementale en les comparant entre eux.

C'est pourquoi, une analyse de cycle de vie sera réalisée à l'échelle du quartier en faisant varier les paramètres de rénovation. Le but ultime étant de fournir des recommandations aux choix de rénovation et leur impact environnemental estimés.

1.4. Structure du mémoire

Ce mémoire est structuré en quatre parties. Tout d'abord, il s'agit de l'introduction. Dans cette partie, nous présentons la motivation de ce sujet de mémoire et la finalité souhaitée à l'issue du travail réalisé. Ensuite, la deuxième partie donne une définition générale de l'analyse du cycle de vie, explique la méthodologie et son application à l'échelle du quartier. C'est également dans cette partie que sera exposée l'état de l'art issu de la recherche documentaire. Puis, la troisième partie exposera la méthodologie et les outils utilisés pour réaliser ce travail. Enfin, la dernière partie présentera l'étude réalisée ainsi que les résultats obtenus. Ce mémoire

se clôturera par les conclusions et les discussions en fonction des aboutissants du travail.

PARTIE 2 | ÉTAT DE L'ART

Nous allons maintenant nous intéresser à la méthode de l'ACV. En effet, après avoir présenté de manière générale la méthode de l'ACV, nous présenterons la méthode de l'ACV à l'échelle du quartier en présentant également les principaux résultats issus de la recherche documentaire.

2.1. Définition

Historiquement, l'analyse du cycle de vie est un processus créé pour l'industrie ; il peut s'appliquer à un produit, un service ou un système. Ce processus évalue l'impact environnemental potentiel de l'objet en question afin de distinguer les points améliorables du produit pour contribuer au développement des nouveaux produits (Jolliet O. et al. 2010).

Or cet outil évalue l'impact environnemental potentiel et non réel. L'impact environnemental réel représente les préjudices portés à l'environnement. « Au nombre d'une douzaine, ces impacts affectent principalement la qualité de l'air, la qualité de l'eau et la santé humaine » (ADEME, 2018). Tandis que l'impact environnemental potentiel évalué lors d'une ACV n'évalue pas les conséquences sur l'environnement mais ne donne plutôt qu'une « indication de danger » (Allacker, 2010).

Dès lors, nous pouvons affirmer que l'analyse du cycle de vie est un moyen utilisé pour apporter une aide à la décision pour les acteurs du secteur du bâtiment (Polster, 1995).

2.2. Méthode de l'ACV

Selon les normes internationales de l'ACV (ISO 14044, 2006), il y a quatre phases dans l'étude :

- Définition des objectifs et du champ de l'étude
- Inventaire, « Life Cycle Inventory » (LCI)
- Evaluation de l'impact, « Life Cycle Impact Assessment » (LCIA)
- Interprétation des résultats

Selon la norme ISO 14040, l'ACV est définie comme « la compilation et l'évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits tout au long du cycle de vie » (Allacker, 2010). Ainsi, les phases énoncées précédemment se structurent sous forme de cycle répétitif. Ceci implique que le processus est évolutif puisqu'il peut être réadapté en fonction des nouvelles données. Voici illustré dans la

figure 2 ci-dessous, l'organisation des phases de l'étude qui seront détaillées dans les parties suivantes.

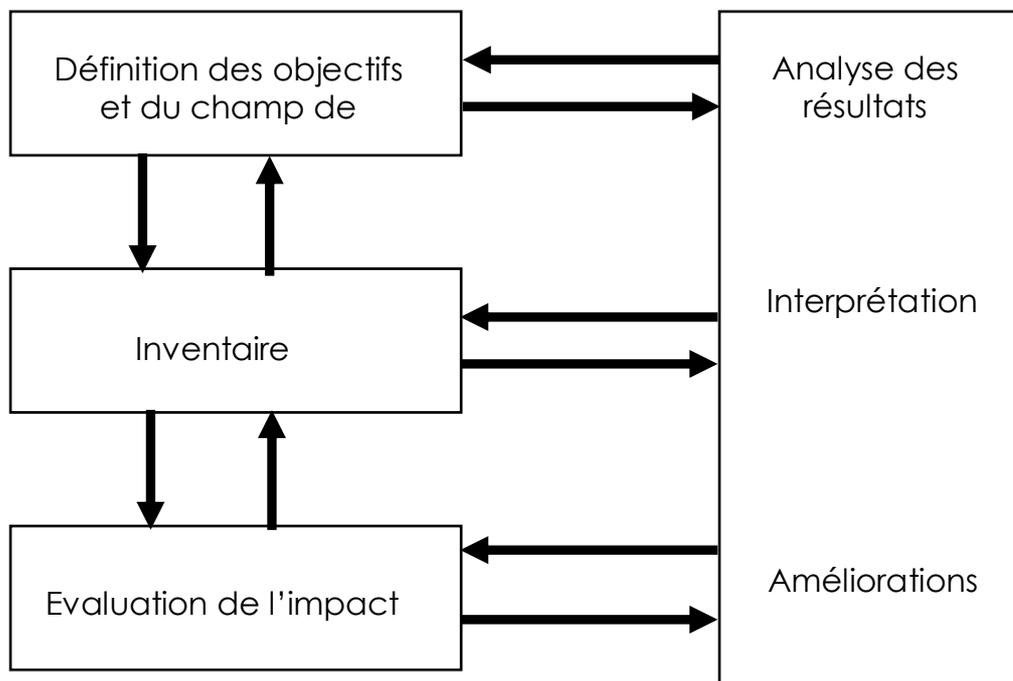


Figure 2 Phases de l'ACV (LEMA, 2012)

2.2.1. Définition des objectifs et du champ de l'étude

Dans cette première étape, il s'agit de poser le problème et de définir, le but et les objectifs du champ de l'étude. Lors de cette étape déterminante il faut également définir des éléments cruciaux tels que la fonction du système, l'unité fonctionnelle et les limites du système considéré. Dès lors, seront définis en détails les scénarios de base et ceux alternatifs à étudier, l'étendue de l'analyse et le type de résultats à atteindre (ISO 14044, 2006 ; Jolliet et al., 2010).

Pour définir les objectifs, il s'agit essentiellement d'expliquer simplement et clairement les applications de l'étude. Ils peuvent répondre à des besoins d'amélioration d'un produit, des enjeux environnementaux, sociétaux, économiques ou politiques. Ainsi, la détermination des objectifs à atteindre permet de poser les hypothèses de bases, d'établir une méthodologie de travail tout en identifiant les limites de la méthode. Dès lors, le niveau de détail nécessaire pour l'application de la méthode est défini. En effet, selon le public visé, le niveau technique sera adapté. De plus, il faut également présenter les acteurs de l'étude, les demandeurs et les financeurs qui ne

doivent cependant pas influencer les résultats obtenus. (Menet et al., 2014 ; Buyle et al., 2013)

Le champ d'étude quant à lui est défini par le choix d'une unité fonctionnelle et la définition des frontières du système considéré.

L'unité fonctionnelle détaille la fonction et les caractéristiques du produit qui est l'unité de référence permettant l'interprétation lors de l'ACV

2.2.2. Inventaire

La deuxième étape de l'ACV est l'inventaire du cycle de vie (ICV). Elle consiste à recueillir les données nécessaires à la réalisation de l'étude et à les quantifier. Ces données sont qualifiées d'entrées et de sorties du système. On définira et quantifiera donc les émissions polluantes dans l'air, dans l'eau et dans le sol et les ressources utilisées pour la conception du système comme les extractions des matières premières et l'utilisation des sols.

La disponibilité et la fiabilité des données est un aspect primordial de cette phase d'étude même si la variabilité et l'erreur sur les données peuvent provenir de différentes sources. M. Buyle et al. (2013) sépare ces sources en quatre catégories : les incertitudes de mesures, les variations spécifiques au processus, les variations temporelles etc. (1) la justesse des données (2), l'incertitude du modèle (3) et enfin la négligence des flux importants (4).

Le recueil de données est un travail long et lourd. De nombreuses bases de données se sont développées afin de faciliter la tâche. La plus connue s'appelle Ecoivent.

La variabilité du résultat de l'ICV influant grandement l'évaluation de l'impact, il convient d'utiliser des standards harmonisant les procédures de collectes de données tels que le standard européen EN 15978:2011.

2.2.3. Evaluation de l'impact

La troisième phase de l'ACV est l'évaluation de l'impact du cycle de vie (LCIA). L'objectif ultime de cette étape de l'ACV est de pouvoir quantifier les conséquences environnementales (ou tout simplement l'impact environnemental) du système étudié. Cette évaluation prend appui sur les données récoltées lors de l'inventaire. Elle est constituée de trois étapes obligatoires (M.Buyle et al., 2013) :

1. Sélection des catégories d'impact en fonction des paramètres de but et de portée : par exemple l'acidité, l'effet de serre, la toxicité humaine etc.
2. Affectation des résultats du LCI aux catégories d'impact sélectionnées (classification) : on pourrait par exemple affecter des émissions de NO_x , SO_2 à la catégorie des émissions d'acidité
3. Calcul des indicateurs de catégorie (caractérisation)

Il est possible d'effectuer des étapes supplémentaires comme la normalisation et la pondération.

La normalisation permet de pouvoir comparer l'effet du système dans une catégorie d'impact donnée.

La pondération permet de donner plus ou moins de poids aux différentes catégories d'impact sélectionnées en fonction de l'importance de leurs conséquences.

Il existe un grand nombre de catégories d'impact qui sont régulièrement utilisées dans le domaine du bâtiment telles que le potentiel de réchauffement global. (GWP), le potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphériques (ODP) ou encore le potentiel d'acidification des sols et des eaux (PA). Il est envisageable de définir de nouvelles catégories d'impact lors que celles existantes ne sont pas suffisantes comme indiqué dans la norme ISO 14044.

Lors de la caractérisation, les émissions à l'intérieur de chaque catégorie d'impact sont pondérées.

Deux approches sont possibles lors de la LCIA : une approche orientée problème et une approche orientée dommage (Stephan, 2013). Il est aussi possible de combiner les deux approches.

La première approche est appelée aussi l'approche "mid-point" car elle se concentre sur les impacts en amont ou au cours du processus environnemental. On peut ainsi classifier ces impacts dans des catégories regroupant des effets physiques telles que le potentiel de réchauffement climatique ou encore le potentiel d'acidification. L'intérêt est d'avoir une vue d'ensemble des différents impacts. Ceci-dit, il devient difficile de pouvoir comparer les impacts pour jauger leurs importances relatives.

La seconde approche consiste à se focaliser sur les points intervenants à la fin du processus environnemental d'où le nom d'approche end-point. Cela permet de pouvoir catégoriser les impacts en tant que dommages tels que la santé humaine ou l'épuisement des ressources naturelles. La comparaison devient plus aisée mais les mécanismes physiques sont moins apparents (Kofoworala, 2009).

2.2.4. Interprétation

L'interprétation du cycle de vie est la dernière phase de l'ACV. Durant cette phase, l'inventaire et l'évaluation d'impact est relié avec les objectifs et le champ d'étude défini au début de l'analyse. Le but est de synthétiser les résultats, d'y dégager une cohérence afin de présenter une conclusion qui explicite les limites et fournit les recommandations nécessaires à la prise de décisions dans le cadre du champ de l'étude (Reiter, 2010).

2.2.5. Limites

L'Analyse de Cycle de Vie est un outil puissant qui permet d'avoir une vue d'ensemble d'un système inscrit dans son cadre environnemental. Une méthodologie scientifique atteste de la rigueur de l'analyse faite et les différents standards tendent à harmoniser les diverses études.

Il existe cependant divers points qu'il faut garder en tête lorsque l'on prend une décision basée sur une ACV. La principale limitation de cette approche est sa non-reproductibilité (Buyle, 2013). En effet, différentes méthodes donnent différents résultats. Les résultats d'une ACV n'ont donc pas une valeur absolue. Ils ont un sens dans un cadre donné et avec une unité fonctionnelle précise. Les propriétés spécifiques des différents cas tels que le niveau de confort, la réglementation locale rendent très difficile toute tentative de comparaison de deux études.

Lors de la description de la phase de l'inventaire, nous avons déjà mentionné les limites dues aux incertitudes sur les données. On peut ajouter à cette incertitude des données, une sur-simplification des modèles et des scénarios et ainsi on peut obtenir une déviation significative avec la réalité (Buyle, 2012). Même s'il est difficile d'agir sur les erreurs dues aux modèles et scénarios, il est cependant possible de limiter au maximum les incertitudes liées aux données en utilisant des indications de fiabilité associées à chaque paramètre dans des bases de données telles que Ecoinvent par exemple.

Il existe aussi des limitations qui ne sont pas propre à l'ACV en particulier mais plutôt à l'utilisation de l'ACV dans le domaine du bâtiment.

Par exemple, un point qui rend difficile l'utilisation de ce type d'analyse est la longue durée de vie des systèmes étudiés (50-100 ans). L'évolution des techniques constructives, des méthodes de recyclage devient difficile à prévoir.

Dans le domaine du bâtiment, la plus grosse contribution à l'impact environnemental d'un système provient de l'usure. Or l'usure est un processus qui dépend directement du comportement des habitants, comportement qui est de toute évidence non prédictible précisément lors de l'ACV. Le comportement des habitants peut rendre des mesures d'efficacité énergétiques contradictoires. En effet, plus un système est efficace, moins l'énergie coûte cher et plus l'utilisateur accepte de dépenser plus d'énergie

car le coût est moindre. Un exemple concret de ce processus est le cas d'un logement bien isolé. Les habitants du logement auront tendance à régler leur température à une moyenne plus élevée car le prix payé pour l'énergie dépensée est moindre. Cet effet appelé "effet de rebond" n'est donc actuellement pas pris en compte dans les évaluations (Greening, 2000)

Une faiblesse inhérente à l'ACV est aussi la négligence des impacts locaux. Le calcul se fait généralement à l'échelle globale alors que des spécificités locales ont des importances non négligeables à l'échelle globale. Par exemple, des émissions dégagées dans des espaces plus vulnérables auront plus d'effet global. Il est possible de limiter cette conséquence en couplant l'ACV à une analyse de risque (Finnveden, 2005).

L'ACV néglige aussi certains aspects qualitatifs comme la qualité de vie ou l'esthétique qui ont un impact environnemental.

L'ACV reste donc un bon outil scientifique sur lequel il est possible de s'appuyer pour prendre des décisions à condition de garder en tête les différentes limitations propres à ce type d'analyse.

2.3. ACV à l'échelle du quartier

Nous venons de présenter la méthode de l'ACV de manière générale, ainsi que ses limites. A présent, dépassant l'échelle du bâtiment, nous allons directement nous intéresser de manière plus réaliste à l'échelle du quartier. Pour cela, nous présenterons dans un premier temps la méthode applicable à l'échelle du quartier, ses limites, ainsi que les principaux résultats issus de l'état de l'art.

La question de l'environnement est de plus en plus présente dans notre société, ainsi les interrogations qui existent actuellement à l'échelle du quartier vont rapidement remonter jusqu'à l'échelle urbaine. La méthode ACV est donc un moyen pour atteindre une conception urbaine respectueuse de l'environnement sur différents aspects comme la conception bioclimatique, la densité urbaine ou la mobilité urbaine.

Les ACV s'avèrent donc être un outil majeur lors de la conception d'un quartier, néanmoins, il existe très peu de travaux et de publication les présentant. Parmi les quelques études, on retrouve celui de l'école des Mines ParisTech qui cherche à développer une méthode scientifique à l'échelle du quartier. Ainsi, le but est de conférer à cette méthode un rôle plus important lors de la phase de conception du projet (Colombert et al., 2011).

Dépassant l'échelle du bâtiment jusqu'à arriver à celui du quartier, il devient nécessaire de prendre en compte des paramètres désormais non négligeables. En effet, les réseaux, les transports, le mix énergétique, les

déchets ou encore les conditions climatiques entrent en jeu. A ce moment-là, faire le bilan énergétique d'un quartier ne signifie pas faire la somme des bilans énergétiques de chaque bâtiment. En effet, un bâtiment peut influencer un autre et vice versa, tous les bâtiments ont une influence entre eux. L'un peut devenir un masque solaire pour l'autre ou encore l'un peut regrouper une chaufferie centrale qui alimente un réseau mutuel (Colombert et al., 2011).

2.3.1. La méthode

L'application de la méthode AVC à l'échelle du quartier relève plusieurs problématiques. En effet, un quartier a beaucoup plus de paramètres qu'un bâtiment seul. Il est compliqué, multifonctionnel et a une durée de vie longue. Ainsi l'une des problématiques est la définition de l'unité fonctionnelle ou la considération des aspects temporels (Lotteau et al, 2015). Une difficulté supplémentaire rencontrée est l'absence de norme permettant de guider la démarche à adopter à l'échelle du quartier. C'est pourquoi, la méthode qui sera présentée dans cette partie s'appuiera 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 afin de déterminer les pratiques correspondantes.

Comme nous l'avons déjà présentée dans la partie concernant la méthode générale de l'ACV, la norme ISO 14044 présente les quatre étapes que doit suivre la méthode de l'AVC. Les quatre étapes sont : la définition du champ d'étude et des objectifs, l'inventaire, l'évaluation des impacts et l'interprétation des résultats. Dès lors, dans cette partie, nous compléterons la méthode générale par les informations qui s'appliquent lorsque nous passons à l'échelle du quartier.

2.3.1.1. Objectif et champ d'application

D'après Lotteau et al. (2015), les études sont menées pour atteindre deux types d'objectifs. L'une vise à produire des connaissances spécifiques sur un quartier spécifique pour améliorer la durabilité du quartier en question et l'autre vise à produire des connaissances plus générales qui serviront à l'élaboration des plans d'actions pour le développement des nouveaux projets.

En effet, la production d'une connaissance spécifique est réalisée par des études d'aide à la décision qui ont lieu lors des premières phases du développement du projet. L'objectif est la définition des impacts environnementaux du projet qui permettra de choisir les axes majeurs du projet. Tandis que la production des connaissances générales est réalisée par les études comparants différents scénarios ou différents quartiers réels.

A partir de ces-derniers, sont issus des conseils de bonnes pratiques à adopter pour une conception écologique.

Ces études s'intéressent pour la plupart aux problématiques liées à la densité urbaine et l'étalement urbain et traitent principalement les gaz à effet de serre et l'énergie.

Le champ d'application quant à lui présente énormément de divergence. La taille des quartiers diffère beaucoup. Nous trouvons des études portant sur 0,02 km² et d'autres études portant sur 4,42 km². Parfois le type de quartier est également différent, certains sont uniquement résidentiels alors que d'autres sont multifonctionnels. De plus, la densité, comme le périmètre, varie énormément allant de 370 à 34 400 habitants/km² (Lotteau et al., 2015).

L'unité fonctionnelle pourtant importante pour l'étude n'est pas clairement définie, ceci génère une hétérogénéité lors des études. En effet, certains considèrent le quartier dans sa totalité comme unité fonctionnelle, c'est le cas de Herfray et al. (2011) qui considère l'unité fonctionnelle comme : « un quartier avec 887 habitants, 734 employés de bureaux, 432 employés de magasins et 240 étudiants localisés près de Paris et considéré sur une durée de vie de 80 ans ». Certaines privilégient la considération d'une unité fonctionnelle par personne, par ménage, par m² du quartier étudié, m² d'espace habitable par habitant (Lotteau et al., 2015). D'après Stephan et al. (2013), la compréhension de la totalité des effets de densité urbaine, l'adoption concomitante d'unité fonctionnelle absolue par personne et par unité de surface est le choix la plus pertinente. C'est ce que Norman et al. (2006) avaient appliqué lors de leurs études. En effet, ils ont montré qu'un quartier de faible densité urbaine consommerait entre 2 et 2,5 fois plus d'énergie par personne en comparaison à un quartier à forte densité mais uniquement de 1 à 1,5 fois plus par unité d'espace habité. Cela montre que selon les unités, différentes analyses sont portées. Alors qu'une unité spatiale illustre l'intensité de la consommation de ressources et l'impact du projet, une unité humaine illustre les considérations sociales et l'efficacité d'utilisation des ressources (Lotteau et al., 2015).

Finalement, on rencontre une divergence concernant les frontières et les phases du cycle de vie étudiées. Selon Popovici (2006) le quartier est constitué de trois éléments qui sont : les bâtiments, les espaces publics et les réseaux. Ces éléments sont à considérer sur tout le cycle de vie. Et selon Lotteau et al. (2015), le cycle de vie du quartier peut être classé selon trois grandes catégories : la phase de construction, la phase d'occupation et la phase de déconstruction. Les contributions relatives aux bâtiments, aux espaces publics, aux réseaux et à la mobilité sont à prendre en compte pour chaque phase comme le montre la figure ci-dessous :

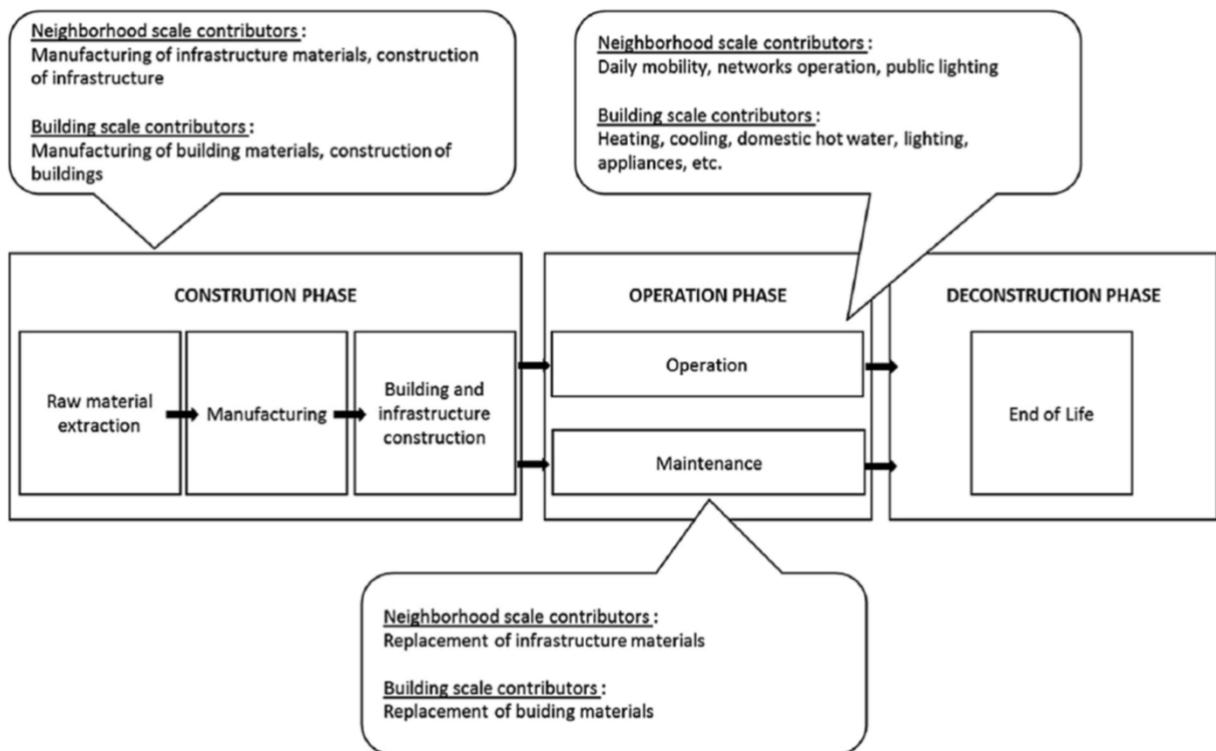


Figure 3 : Etapes du cycle de vie du quartier et les contributions associés (Lotteau et al. 2015)

Selon l'objectif de l'étude, la définition des frontières du système est également différente. En effet, certaines études ne comprennent pas la mobilité et les réseaux dans leurs systèmes, ils sont traités autrement. Différents moyens de transports sont par exemple considérés ou différents types de routes. Plus encore, les divergences sont davantage marquées lorsque s'effectue le choix des contributions allouées ou pas à chaque élément. Prenons l'exemple de la phase d'utilisation, les consommations peuvent être allouées ou pas aux bâtiments (eau chaude domestique, production de déchets).

Néanmoins des points communs existent entre les études, comme le fait de considérer les réseaux comme un élément passif, seuls les matériaux de production sont pris en compte. Les consommations d'eau, d'électricité et de gaz sont allouées aux bâtiments et aux espaces publics. En revanche, les consommations des ménages telle que la nourriture, les loisirs étant indépendants des bâtiments ou de la mobilité journalière, elles ne sont pas prises en compte (Lotteau et al., 2015).

Les études montrent que la phase opérationnelle et la phase de déconstruction sont considérées différemment. Par exemple, Norman et al. (2006) excluent la phase de construction et de maintenance par l'absence de données et la faible contribution relative à la totalité du cycle de vie. Par ailleurs d'autres études se concentrent uniquement sur l'énergie grise et excluant ainsi la phase d'utilisation comme le font Davila et Reinhart (2013).

2.3.1.2. Inventaire du cycle de vie

L'inventaire du cycle de vie est défini selon deux systèmes : le système de premier plan et le système d'arrière-plan. Le premier comprend les processus étant sous le contrôle du preneur de décision comme les consommations de matériaux, d'eau et d'énergie, les besoins liés aux transports, les réseaux et les espaces publics principalement. Le deuxième système comprend les processus n'étant pas sous le contrôle du preneur de décision (Lotteau et al., 2015).

Selon la taille de projet, la détermination des matériaux de construction est réalisée selon différentes méthodes. Généralement, les quantités sont déterminées à partir d'une analyse des plans ou du master plan mais il est également possible d'avoir recours à des bâtiments types avec des données disponibles ou bien la réalisation d'une analyse des plans de chaque bâtiment est possible pour les projets de plus petite taille. L'analyse de plan permet également de déterminer les quantités de matériaux relatives aux réseaux ou aux espaces publics. En revanche les données concernant les travaux de construction ne sont mentionnées dans aucun étude (Lotteau et al., 2015).

Les consommations énergétiques des bâtiments sont classées selon deux types. Le premier comprend les consommations utilisées pour le chauffage, le refroidissement et la production d'eau chaude sanitaire avec la source identifiée et le deuxième comprend le reste des énergies utilisables comme l'électricité qui ne sont pas systématiquement prise en compte. Des études, des données nationales, des modélisations permettent d'obtenir des données concernant le chauffage. Par exemple Herfray et al. (2011), Colombert et al. (2011), Sevin (2018), Kameni et al. (2019) utilisent des simulations thermiques des bâtiments alors que Stephen et al. préfèrent une simulation sur des transferts de chaleur statiques. Lotteau et al. (2015) proposent quant à eux de prendre en compte les consommations des standards énergétiques visés avec des simulations thermiques des bâtiments, des modélisations avec des simulations basées sur des transferts de chaleur en statique, des modélisations se concentrant que les consommations du standard énergétique.

Les données concernant la mobilité peuvent s'obtenir également par différents moyens. Certains comme Stephen et al. (2013) et Kameni et al. (2019) s'appuient sur des moyennes régionales, tandis que d'autres

s'appuient sur des méthodes normatives plus complexes. Certains développent même leur propre modèle statistique (Lotteau et al., 2015).

L'extraction des ressources, la production des produits de construction, d'eau ou d'électricité sont heureusement inventoriées dans des bases de données, ceci permet un gain de temps considérable lors des études d'ACV. La plus sûre et la plus utilisée à ce jour pour les pays européens est la base Ecoinvent déjà mentionnée plus haut (Lotteau et al., 2015).

2.3.1.3. Évaluation de l'impact

Malgré le fait que la méthode ACV soit basée sur une analyse multicritère, on peut retrouver plusieurs études limitées seulement à la consommation d'énergie primaire et l'émission de gaz à effet de serre.

Néanmoins, il est possible de retrouver des études réalisées par le biais du logiciel EQUER qui se concentrent sur des critères plus nombreux.

Trigaux et al. (2014) se sont eux intéressés au réchauffement climatique, l'épuisement de la couche d'ozone, l'acidification des sols et des sources d'eau, l'eutrophisation de l'eau, la formation d'oxydant photochimique, l'épuisement des ressources abiotiques, la toxicité humaine et bien d'autres encore.

Frosberg (2003) quant à lui a réalisé une analyse en utilisant un outil appelé « Profil de charge environnemental ». Cet outil analyse moins d'impact que le logiciel EQUER.

Ainsi chacun choisit les indicateurs en fonction de son outil d'analyse. Il existe différentes méthodes de calculs (CML-IA, Eco-Indicator 99, Ecoscarcity Suisse, ReCiPe et ILCD étant la plus récente).

En plus des indicateurs présents dans les différentes méthodes listées et ceux présents dans les normes européennes, de nouveaux indicateurs viennent s'ajouter tels que la production de mauvaises odeurs, la santé humaine ou l'occupation du sol (Lotteau et al., 2015).

2.4. Limites de la méthode

A cause de l'hétérogénéité des résultats dû à la singularité des quartiers étudiés il est difficile de les comparer. Pour cela, il faudrait pouvoir définir une seule unité fonctionnelle (Lotteau et al., 2015). Selon Herfray et al. (2011), la définition de l'unité fonctionnelle dépendrait de l'objectif de l'étude. Ils insistent cependant sur la nécessité d'inclure des points communs afin de pouvoir faire des comparaisons. Ainsi, la fonction du quartier (résidentiel, tertiaire, loisirs...), quelques quantités (m² d'habitations, de bureaux, de commerces, espaces publics, nombre d'habitants...), des critères de qualité (thermique, visuel, confort acoustique, ...) et la durée de l'analyse.

Cependant, Loiseau (2014) développe l'idée de l'unité fonctionnelle « multi-dimensionnelle » à l'échelle territoriale en essayant d'adapter la méthode de l'ACV à l'évaluation environnementale dans l'aménagement du territoire. Or, comme pour les quartiers, Loiseau identifie la multifonctionnalité des territoires comme étant problématique pour l'application de l'ACV puisqu'une fois de plus, la définition de l'unité fonctionnelle n'est pas vraiment respectée.

Une autre approche pour surmonter l'unicité de l'unité fonctionnelle est de faire comme Norman et al. (2006), Stephen et al (2013) et Nichols et Kockelman (2014). Il s'agit d'utiliser des unités fonctionnelles complémentaires spatiales, par habitant et absolues.

La contextualisation de l'ACV à l'échelle d'un quartier est un défi supplémentaire qui aiderait pourtant énormément les projets de développement des quartiers ou pour l'élaboration des politiques urbaines. Le manque de considération de la singularité de chaque quartier devient une limite dans l'ACV mais également dans toutes les autres approches existantes pour l'évaluation de la durabilité à l'échelle du quartier (Riera Perez et al., 2013).

En effet, contrairement aux produits industriels un quartier est un système très fortement contextualisé. Il est intégré à un environnement spécifique et soumis à un climat spécifique. Des habitants avec des exigences différentes y habitent. Dès lors, la contextualisation dans la phase d'inventaire nécessite davantage de données spécifiques au site. L'utilisation énergétique opérationnelle des bâtiments reste spécifique au site dans lequel ils sont implantés. En effet, Gracik et al. (2015) ont par exemple constaté que les variations du climat et des flux d'air locaux autour des bâtiments peuvent entraîner une réduction de 17% du COP des climatiseurs dans un contexte urbain (comparé à un contexte rural).

Par ailleurs, comme nous l'avons déjà mentionnée dans une partie précédente, deux approches existent pour évaluer la consommation énergétique des bâtiments : l'utilisation des données statistiques et l'utilisation des données de simulation thermique statiques à l'échelle du bâtiment. Ces deux approches présentent des avantages et des inconvénients.

En effet, la simulation thermique à l'échelle du bâtiment permet la contextualisation nécessaire pour la phase d'inventaire. A l'échelle du bâtiment, le climat local est pris en compte (irradiation solaire, vent) mais également l'interaction entre les bâtiments et l'environnement (masque solaire, réflexion). Or ce type d'analyse nécessite beaucoup de temps et de données qui ne sont pas disponibles au début du développement d'un projet.

D'autre part, l'utilisation des données statistiques paraît plus judicieuse du fait de leur disponibilité mais elle reste imprécise pour l'établissement de la conception d'un processus d'efficacité énergétiques pour les bâtiments.

Dès lors de nouvelles approches doivent être développées afin d'améliorer la contextualisation de la consommation énergétique des bâtiments dès la phase de conception des projets. Ces outils devraient

également prendre en compte les mécanismes environnementaux et les rendre applicables à l'échelle régionale. En effet, il existe plusieurs catégories d'impacts locaux et régionaux qui sont contextualisés mais pas encore opérationnels tels que la privation d'eau, l'eutrophisation ou encore l'utilisation des sols (Lotteau et al., 2015).

Concernant les aspects temporels maintenant, la durée du cycle de vie fait partie des problématiques. En effet, un quartier est construit sur base de durer pendant plusieurs décennies, il est construit avec des éléments durables qui ont chacun des durées de vie différentes. Plus encore, les bâtiments subissent des travaux de maintenance ou des travaux de rénovation qui viennent changer à nouveau la durée de vie du bâtiment, du quartier. A ce jour, un consensus n'ayant pas lieu concernant la durée de vie à considérer à l'échelle du quartier, elle change entre 50 et 100 ans dans les cas d'études.

Un autre aspect à prendre en compte est le comportement dynamique. Peuportier et Roux (2013) prenant en compte cet aspect ont montré qu'une différence de 30% par rapport à une ACV standard en considérant le mix d'électricité moyen annuel. Ils conseillent également de prendre en compte : l'étude des stratégies de transfert de la demande selon la variation temporelle des impacts, l'augmentation de la fraction solaire passive malgré une charge de refroidissement plus élevée afin de minimiser les impacts sur un an, améliorer la prise de décision de procédés de production d'électricité sur site.

En conclusion les limites de l'ACV à l'échelle du quartier sont liés aux problèmes de comparaisons dû à l'absence d'unité fonctionnelle à cette échelle. Par ailleurs la reproductibilité de la méthode est sujet à discussion du fait de la singularité des quartiers (par leurs fonctions, réseaux, ...), de la contextualisation et les aspects temporels.

Nous allons maintenant présenter les principaux résultats issus de l'état de l'art.

2.5. Résultats issus de l'état de l'art

En effet, cette partie expose les résultats issus de l'état de l'art réalisé par Matthieu Sevin dans le cadre de son TFE en 2018 que nous venons compléter.

La consommation d'énergie durant la phase opérationnelle est celle qui engendre le plus d'impacts environnementaux sur tout le cycle de vie complet d'un quartier d'après l'étude de Stephan et al. (2013). En effet, elle représente 40% des consommations d'énergie primaire, 42% des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, la mobilité engendre plus d'un tiers des consommations d'énergie primaire et plus de 20% des émissions de gaz à effet de serre. Il faut cependant noter que pour cette étude, Stephan et al. ont compris l'énergie grise des routes dans la mobilité également. D'où la

contribution élevée des routes dans l'énergie grise totale et l'insignifiance des travaux de construction relativement parlant avec 1,3% de contribution à l'énergie grise et seulement 0,03% des consommations totales d'énergies sur le cycle de vie entier.

Concernant l'étude de Nichols et Kockelman (2014), elle analyse 4 quartiers. La consommation d'énergie primaire s'élève à 53% pour les constructions, 45,5% pour la mobilité et seulement 1% pour les infrastructures publiques (eaux, éclairage).

Norman et al. (2006) comparent des développements urbains de densité différentes. Ils concluent que la contribution de la mobilité est bien plus significative pour la consommation d'énergie totale et les émissions de gaz à effet de serre lorsqu'il s'agit d'un développement urbain de faible densité. D'où la part des impacts liés aux bâtiments devient plus grande lorsqu'il s'agit de développement urbain à densité élevée.

10% de la consommation totale d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre sont dus à la production des matériaux de constructions. Que ce soit pour des quartiers à faible ou forte densité, les résultats donnés par habitat révèlent que la majorité des émissions de gaz à effet de serre est due à la mobilité. Alors que la majorité des consommations d'énergie est due à la phase opérationnelle des constructions.

Trigaux et al. (2004) compare 4 scénarios avec différents types de bâtiments. Il en résulte que les infrastructures routières contribuent pour 1 à 6% des impacts totaux.

Herfrey et al. (2011) et Herfray (2011) s'intéressent à des quartiers à faibles consommations énergétiques et excluent la mobilité. Leurs résultats montrent que la consommation d'énergie primaire compte pour respectivement 7% et 13,5%, la phase opérationnelle, elle, compte pour 92% et 85% et la phase de déconstruction, 1% et 1,5%. Une fois de plus, les phases de construction et de déconstruction deviennent négligeables devant la phase opérationnelle.

Cependant, dans la première étude de Herfray et al. (2011) un quartier à énergie positive présente des résultats différents. Effectivement, dans ce quartier, la phase de construction compte pour 41,5% des consommations énergétiques. Cette valeur se rapproche de celle concernant la phase opérationnelle, 53,5%. De fait, les quartiers composés de bâtiments à faible consommation d'énergie voient une augmentation relative de la contribution des phases de construction et de destruction.

Cherqui (2005) montre également la dominance de la phase opérationnelle concernant la consommation des énergies et l'émission des gaz à effet de serre mais aussi 9 autres indicateurs face aux phases de construction et déconstruction. Cependant, c'est la phase de déconstruction qui domine lorsqu'il s'agit de la production des déchets bien évidemment.

L'étude menée par Kameni M. et al. concerne la simulation de deux anciens quartiers situés en Belgique, l'un dans une zone urbaine et l'autre en banlieue. Les résultats de l'étude ont montré que la phase d'utilisation contribue jusqu'à 90% de la charge environnementale totale. Or en raison des réglementations de plus en plus strictes, les nouveaux bâtiments deviennent plus économes en énergie et, par conséquent, les autres phases du cycle de vie gagnent en importance.

Peuportier et al. (2006) met en avant l'influence de l'architecture sur les performances énergétiques des bâtiments. Les consommations simulées via le logiciel EQUER entre deux bâtiments d'un même quartier mais dans des îlots différents peuvent jusqu'à tripler alors que leurs caractéristiques techniques restent les mêmes.

Finalement, voici les conclusions générales que nous parvenons à tirer à travers les différentes études de cas (Lotteau et al., 2015) :

- Les bâtiments et la mobilité sont les premières sources responsables des émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie primaire.
- La contribution de la mobilité et de l'énergie grise du quartier, de la consommation d'énergie primaire et des émissions de gaz à effet de serre des bâtiments peuvent être du même ordre de grandeur.
- La phase opérationnelle prédomine les autres sauf lorsque l'impact étudié évalué est la création des déchets.
- Lorsqu'il s'agit des quartiers très économes en énergie, la phase de production peut devenir aussi importante que la phase opérationnelle.

Ainsi nous arrivons à la fin de la partie consacrée à l'état de l'art. Nous allons maintenant nous intéresser à l'explication de la méthodologie utilisée pour réaliser l'étude.

PARTIE 3 | METHODOLOGIE

Dans cette partie, nous présenterons la méthodologie adoptée pour mener l'étude. Tout d'abord, il s'agit de choisir un quartier d'étude, les pays d'étude, de définir les hypothèses prises en compte pour l'ACV, l'outil d'analyse choisi et enfin les différents scénarios choisis.

Par la suite, nous réaliserons une première ACV grâce à une suite de logiciels sur le quartier choisi, dans différents pays. Ces premières simulations nous serviront de base. Nous simulerons ensuite différents scénarios, dans ces mêmes pays, faisant varier plusieurs paramètres et nous les comparerons aux simulations de base.

Enfin, nous comparerons les résultats des différents scénarios pour intra-pays mais aussi inter-pays.

3.1 Pays d'étude

L'objectif de ce TFE étant de montrer l'impact environnemental d'une rénovation de quartier dans différents pays européens, nous allons maintenant choisir les différents pays d'étude.

Afin d'avoir tout de même des résultats comparables, nous avons décidé de sélectionner des pays faisant partie de l'Union Européenne. De plus, nous avons choisi des pays situés dans des zones climatiques différentes afin de montrer l'influence du climat dans l'ACV. Enfin, concernant les villes d'étude, nous avons veillé à ce qu'elles soient de taille similaires en nombre d'habitants et en services proposés.

Dès lors, nous avons choisi les villes de Stockholm (Suède), Liège (Belgique), Lyon (France) et Barcelone (Espagne).



Figure 4 : Localisation des villes d'étude

Stockholm est la capitale de la Suède, elle compte 935 000 habitants. Elle est sous le climat continental.

Liège est la capitale de la Wallonie, en Belgique. La province de Liège compte 1 105 326 habitants (2018). Elle est sous le climat océanique.

Lyon est située dans la région Auvergne-Rhône-Alpes, en France ; elle compte 1 370 678 habitants (2018). Elle est également sous le climat océanique.

Barcelone est la capitale de la Catalogne, en Espagne. Elle compte 1 620 343 habitants (2018) et est située sur le littoral méditerranéen. Elle est sous le climat méditerranéen (fr.climate-data.org).

3.2 Quartier d'étude

Afin de rendre l'étude la plus réaliste possible, nous avons choisi un quartier existant. Notre choix s'est porté sur le quartier de Saint-Léonard à Liège, en Belgique qui a un profil adapté à cette étude. En effet le quartier de Saint-Léonard a connu une forte densification au XXème siècle et présente un stock considérable d'anciens bâtis prêts à être rénovés.

3.2.1. Le quartier

Le quartier Saint-Léonard comprend un ancien îlot fermé, rue Maghin à Liège, en Belgique. Le quartier Saint-Léonard apparaît au VIIIème siècle, sous forme de hameau. Il s'y développe plutôt des activités agricoles dans un premier temps puis des regroupements d'habitations apparaissent au XIème siècle. Suite à un essor économique au XXème siècle, le quartier connaît un grand développement aussi bien industriel que résidentiel, et les bâtiments que nous trouvons encore à cette époque s'édifient à ce moment-là.

Actuellement, le quartier Saint-Léonard bénéficie d'une politique de rénovation urbaine pour répondre aux problématiques d'aménagement urbain et de logements dans le quartier (www.saint-leonard.be).

L'îlot, très proche du centre-ville, est bien desservi par les transports en communs. De nombreux petits commerces, centres de soin, activités économiques sont situés en proximité directe de l'îlot, tout est donc facilement accessible à pied.



Figure 5: Localisation du quartier d'étude



Figure 6 : Vue aérienne rapprochée du quartier d'étude

3.2.2 Le programme

Le quartier de Saint-Léonard est composé d'anciennes maison de maîtres, mitoyennes. La plupart des constructions sont à destination résidentielle mais de nombreuses surfaces proposent des activités de type restauration ou service. Notre quartier, lui, est composé de maisons de maître, mitoyennes. N'ayant pas accès aux cours intérieurs, nous supposons par l'image satellite qu'il s'agit d'un sol imperméable. Au rez-de-chaussée de certaines maisons se trouvent des espaces dédiés au service. Des places de parking se trouvent en bordure de rue. L'îlot est composé de 20 maisons, et le nombre d'occupants est estimé à 92.

3.3. Hypothèses concernant l'ACV

3.3.1 Objectifs et champ d'application

L'objectif de ce TFE est de quantifier l'impact environnemental de la rénovation d'un quartier dans plusieurs pays européens afin de pouvoir tirer des conclusions générales, applicables à d'autres cas également. Cette

étude pourrait en quelque sorte donner des conseils de bonne pratique pour les futures rénovations envisagées.

3.3.2. Unité fonctionnelle

Il s'agit d'une étape très importante. Nous l'avons montré dans les parties précédentes, la multifonctionnalité des quartiers génère des problématiques lors de la définition de l'unité fonctionnelle. C'est pourquoi, nous négligeons la fonction service se trouvant en rez-de-chaussée et attribuons la fonction résidentielle uniquement. Pour notre étude, nous considérerons les impacts environnementaux suivant trois unités fonctionnelles. Tout d'abord, les résultats bruts qui correspondront à l'unité fonctionnelle « ancien quartier résidentiel de 4 423 m² comportant 3 564 m² de voiries, trottoirs, 859 m² de surface construite au sol, 2 577 m² de plancher, accueillant 92 personnes, étudié sur une durée de vie de 100 ans situé à Liège en Belgique (puis à Lyon en France, à Stockholm en Suède et à Barcelone en Espagne).

3.3.3. Frontières du système

Pour cette, étude, tout le cycle de vie des paramètres étudiés sera pris en compte. Nous étudierons l'impact du climat principalement, puis l'impact d'une rénovation légère et lourde, la gestion de l'eau, le mix énergétique, les espaces publics et la mobilité.

3.4. Données

Notre étude porte sur 4 pays situés dans des zones climatiques différentes. Les données climatiques proviennent de « Météonorm ». Il s'agit d'un outil très performant qui contient une base de données exhaustive. Des algorithmes créés à partir des valeurs récoltées depuis plus de 8 000 stations météo réparties partout dans le monde et de fichiers météo. Les modèles de changement climatiques sont également inclus ; ces calculs se font en utilisant un modèle stochastique. Ainsi, le logiciel fournit plusieurs paramètres tels que l'azimut solaire et d'élévation, l'intensité lumineuse, les précipitations, l'humidité et bien d'autres encore.

Quant aux données environnementales que nous utiliserons pour ces quatre pays qui concernent la fabrication des matériaux, la production d'énergie et d'eau, le traitement des déchets et des eaux usées, les transports et d'autres encore, elles proviennent de la base de données Ecoinvent. Il s'agit d'une base de données élaborée par plusieurs instituts de recherches suisses. Elle fournit pour chaque procédé et matériau, un

inventaire du cycle de vie qui donne l'ensemble des flux de matière et d'énergie entrants et sortants du système (Peuportier et al., 2006) :

- Les ressources utilisées (eau, énergie par exemple)
- Les émissions dans l'environnement : eau, air, sol (ammoniaque dans l'eau, CO₂ dans l'air, métaux dans le sol par exemple)
- Les déchets créés (inertes, toxiques ou radioactifs par exemple)

Pour notre étude, la version 2.2 de la base Ecoinvent sera utilisée. Elle est élaborée par des processus qui ont été certifiés comme étant fiables. Le centre Ecoinvent est reconnu dans le monde entier pour ses données d'écobilan et la transparence de ses méthodes. La base de données est vérifiée par des experts internationaux et est régulièrement mise à jour (ecoinvent.org)

3.5. Indicateurs environnementaux

Il s'agit maintenant d'identifier les indicateurs environnementaux qui seront évalués pour tous les bâtiments du quartier dans un premier temps puis, sur le quartier dans son ensemble sur tout son cycle de vie. Ainsi les indicateurs environnementaux qui seront évalués sont les suivants (Colombert et al., 2011) :

- L'odeur (mm³ air)
- Les dommages à la santé (DALYs)
- Les déchets radioactifs (dm³) comptabilisent en volume les déchets radioactifs produits de toute catégorie et activité confondues.
- Les dommages à la biodiversité (PDC.m³.an)
- La production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.), due à la décomposition des composés organiques volatils qui a lieu sous l'effet du soleil. Elle est à l'origine de nombreuses affections respiratoires.
- L'eutrophisation (kg PO₄ eq.), un excès de substances nutritives dans un milieu aquatique. Il accélère le développement des algues et de plantes aquatiques qui appauvrissent le milieu environnant en oxygène.
- L'épuisement ressources abiotiques (kg d'antimoine eq.) ou la diminution estimée des stocks de ressources abiotiques qui correspondent aux ressources naturelles non-vivantes comme par exemple les ressources fossiles et minérales.

- Les déchets produits (t), provenant des travaux de constructions, de rénovation, de démolition, de voiries etc...
- L'eau utilisée (m³), quantité d'eau douce puisée.
- La demande cumulative d'énergie (GJ) : l'énergie primaire sur tout le cycle de vie. Par exemple, la phase d'extraction des combustibles fossiles est prise également en compte.
- L'acidification (kg SO₂ eq.) : le potentiel d'acidification d'une substance qui à terme génère une acidification atmosphérique à l'origine des pluies acides. Il se trouve que ces pluies acides sont nocives pour la faune et la flore.
- L'effet de serre (100 ans)(t CO₂ eq) qui est mesuré par le potentiel de réchauffement global (Global Warming Potential) de chacun des gaz à effet de serre.

Ces indicateurs seront évalués sur tout le cycle de vie du quartier mais nous mettrons également en évidence la contribution relative de chaque phase du cycle de vie (construction, utilisation, rénovation, démolition).

La simulation se fera sur une période d'analyse qui couvrira 100 ans. D'après la littérature, c'est la durée de vie supposée d'un bâtiment en prenant en compte sa phase de rénovation.

Ces indicateurs seront évalués sur tout le cycle de vie du quartier mais nous mettrons également en évidence la contribution relative de chaque phase du cycle de vie (construction, utilisation, rénovation, démolition).

La simulation se fera sur une période d'analyse qui couvrira 100 ans. D'après la littérature, c'est la durée de vie supposée d'un bâtiment en prenant en compte sa phase de rénovation.

3.6. Outils

Afin de réaliser les simulations de l'étude, nous allons utiliser une suite de logiciels composée d'ALCYONE, COMFIE-PLEIADES et novaEQUER. Ces logiciels développés par l'école des Mines ParisTech sont acceptés par la communauté scientifique puisqu'ils ont déjà été utilisés dans plusieurs laboratoires de recherches pour plusieurs études.

Voici tout d'abord un schéma qui illustre le fonctionnement des logiciels entre eux.

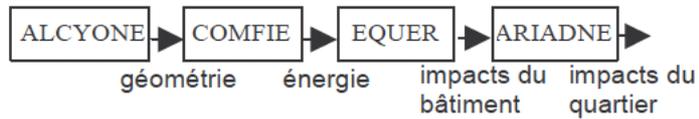


Figure 7 : Chainage des entrées/sorties entre les outils d'évaluation (Peuportier et al., 2006)

En effet, via des fichiers textes, ces logiciels forment une chaîne. Ainsi les données liés au bâtiment (sa géométrie, ses matériaux etc...) sont éditées par le logiciel situé en amont (ALCYONE) puis lu par celui en aval.

Nous allons maintenant présenter chacun des logiciels :

ALCYONE est un logiciel permettant la modélisation numérique. En effet, il permet de définir la géométrie d'un bâtiment, la composition de ses parois et de représenter ses masques solaires (Salomon et al., 2005). ALCYONE permet également de faire un zonage des bâtiments, en effet, ces zones auront un comportement thermique homogène (Colombert et al., 2011).

COMFIE-PLEIADES permet de faire la simulation thermique dynamique des bâtiments importés depuis ALCYONE. Ainsi, à partir des données sur les matériaux des parois, les scénarios d'occupation, les données météorologiques, le logiciel calcule les besoins énergétiques en chauffage, climatisation et éclairage pour les différentes zones définies auparavant. Les calculs se font par le noyau COMFIE et PLEIADES propose l'interface graphique. (Colombert et al., 2011).

NovaEQUER quant à lui, permet d'évaluer la qualité environnementale des bâtiments. Les données calculées depuis COMFIE sont importées dans NovaEQUER. Des données supplémentaires telles que le mix de production d'électricité, les déchets, les consommations d'eau, la mobilité ou encore la constitution des espaces extérieurs sont aussi ajoutées. Une fois ces données entrées, le logiciel réalise l'ACV des bâtiments et du quartier avec la possibilité de visualiser la contribution de chaque phase du cycle de vie et de comparer plusieurs variantes du projet. Les résultats apparaissent sous formes de diagramme radar qui compile les différents impacts environnementaux. (Colombert et al., 2011)

Ces logiciels sont regroupés sous une seule plateforme : PLEIADES ACV. Cependant le fonctionnement reste identique.

3.7. Scénarios

Suite aux discussions menées avec l'équipe de recherche, les membres du jury et les résultats issus de l'état de l'art, nous avons choisi d'étudier ces paramètres :

- Le climat
- La rénovation lourde, et légère
- Le mix énergétique
- La gestion des eaux
- L'installation solaire photovoltaïque
- La mobilité

PARTIE 4 | MODELISATION DU QUARTIER ET ANALYSE THERMIQUE DYNAMIQUE

Afin de ne pas perdre du temps avec l'étape de modélisation, nous avons choisi un quartier déjà modélisé situé dans le quartier Saint Léonard, à Liège, en Belgique, déjà présenté dans les parties précédentes. Nous avons vérifié les matériaux de constructions pour les anciens bâtis dans les 4 pays puis nous avons défini un masque solaire afin de contextualiser l'ensemble des bâtiments modélisés. Ensuite il s'agit d'attribuer à chacune des parois ses propriétés thermiques, de définir le zonage et enfin les scénarios d'utilisation. Dès lors, nous lancerons les calculs de simulation thermique dynamique.

4.1. Données de construction

Il s'agit dans cette partie de saisir les données générales concernant le modèle. En effet, nous saisissons les informations concernant les parois, les menuiseries, les états de surfaces et les ponts thermiques des bâtiments.

4.1.1. Parois

Le détail de la composition de parois est détaillé dans le tableau 1 ci-dessous. Il y est indiqué selon les parois, les matériaux utilisés, leur épaisseur (e), leur masse surfacique (ρe), leur conductivité thermique (λ) ainsi que leur résistance thermique (R).

Paroi	Composant	e(cm)	ρ (kg/m ²)	λ (W/m.K)	R(m ² .K/W)
Paroi externe Brique pleine	Terre cuite	34	646	1.150	0.3
	Plâtre + Cellulose	1.3	16	0.300	0.04
Paroi interne Brique pleine	Plâtre + Cellulose	1.3	16	0.300	0.04
	Terre cuite	34	646	1.150	0.3
	Plâtre + Cellulose	1.3	16	0.300	0.04
Plancher intermédiaire	Bois léger	2.5	13	0.150	0.17
	Mortier	3.0	60	1.150	0.03
	Carrelage	2.0	46	1.700	0.01
Plancher bas	Bois léger	2.5	13	0.150	0.17
	Mortier	5.0	100	1.150	0.04
	Carrelage	2.0	46	1.700	0.01

Tableau 1: Composition des parois

Plus encore, nous renseignons dans le tableau 2 ci-dessous les états de surfaces des différentes parois afin d'étudier le comportement vis-à-vis des rayonnements. Les valeurs données sont celles données par défaut par le logiciel ; ainsi, (ϵ) représente l'émissivité.

Parois	Revêtement	ϵ
Face externe	Brique rouge	0,92
Plancher	Bois	0,9
Toiture externe	Tuile orange	0,88
Face interne	Peinture blanche	0,91
Plafond	Peinture blanche	0,91

Tableau 2 : État de surface des parois

4.1.2. Menuiseries

Modélisant un bâti ancien, nous choisissons des portes et fenêtres d'époque, peu performant donc d'un point de vue de l'isolation. Ainsi nous choisissons un simple vitrage ainsi qu'une porte classique. Le tableau 3 ci-dessous reprend les valeurs caractéristiques U_w donne les transmissions thermiques et « S_w » les facteurs solaires.

	U_w (W/(m ² .K))	S_w
Simple vitrage	4,73	0,59
Porte bois	5	0,19

Tableau 3 : Valeurs caractéristiques des menuiseries

4.1.3. Ponts thermiques

Le tableau 4 ci-dessous reprend les valeurs des ponts thermiques linéiques (ψ).

	ψ (W/m ² .K)
Appui des fenêtres	0,4
Seuil de porte	0,4
Plancher bas	0,44
Angle sortant	0,16
Angle entrant	0,38

Tableau 4 : Ponts thermiques

4.1.4. Données météorologiques

Pour notre étude, l'exactitude des données météorologiques est très importante puisque nous voulons montrer l'influence du climat dans l'étude de l'ACV mais également parce qu'elles jouent un rôle dans la prise en compte des apports solaires par exemple.

Les données météorologiques n'étant pas inclus de base dans le logiciel, nous utilisons un module nommé « météoalc » qui nous permet de créer manuellement une nouvelle station météo. Dès lors, nous importons un fichier météo que nous obtenons depuis Meteonorm (meteonorm.com).

Dès lors, nous obtenons les valeurs pour la température de l'air, de l'eau, les rayonnements, l'ensoleillement, l'humidité relative et le vent.

4.2 Modélisation

Comme dit précédemment, afin de ne pas perdre du temps avec une nouvelle modélisation, nous avons pris un quartier déjà modélisé. Après avoir entré les données citées dans la partie précédente, voici une vue du modèle :



Figure 8 : Modèle 3D du quartier créé sur PLEIADES, seul le bâtiment sélectionné apparaît en couleur

4.3 Données simulation thermique

Dans cette partie, nous définissons les températures de consigne de chauffage pour les zones chauffées, les pourcentages d'occupation et toutes les données qui seront prises en compte pour la simulation thermique.

4.3.1. Température de consigne de chauffage

Nous définissons les consignes de thermostat pour la zone chauffée comme suit :

- 15°C de nuit
- 19°C de jour

4.3.2 Puissances dissipées (W/m²)

Hebdomadaire		Puissance dissipée					
Heure	Lundi Watts/ m ²	Mardi Watts/m ²	Mercredi Watts/m ²	Jeudi Watts/m ²	Vendredi Watts/m ²	Samedi Watts/m ²	Dimanche Watts/m ²
0-1h	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
1-2h	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
2-3h	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
3-4h	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
4-5h	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
5-6h	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70
6-7h	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70
7-8h	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70
8-9h	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
9-10h	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
10-11h	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
11-12h	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
12-13h	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
13-14h	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
14-15h	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
15-16h	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
16-17h	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
17-18h	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
18-19h	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70
19-20h	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70
20-21h	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70
21-22h	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70
22-23h	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70
23-24h	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14

Tableau 5 : Puissances dissipées

4.3.3 Pourcentage d'occupation

En fonction de la superficie totale des bâtiments et le nombre d'occupants estimé à 92, nous déterminons une occupation de 0.217 habitants/m².

Quant aux pourcentages d'occupation, nous fixons :

- 25 % de 7 à 18 heures en semaines
- 100 % le reste du temps

4.3.4 Chauffage

Une chaudière à gaz à condensation est considérée pour l'eau chaude du chauffage et l'ECS. Le PCI est fixé à 86%. Les autres données sont gardées telles que fournies par le logiciel.

4.3.5 Ventilation

Considérant des bâtiments anciens, nous n'ajoutons pas de ventilation mécanique. Seule la ventilation naturelle fait effet. Les infiltrations d'air atteignent 0,6 Vol/h.

4.4 Vérification des premiers résultats de la simulation thermique dynamique

Bâtiments	Besoins de chauffage kWh/m2.an
	Liège
C1	101
C2	112
C3	118
C4	130
Moyenne	112,5

Tableau 6 : Besoins de chauffage de chaque bâtiment situé à Liège

Au vue de la composition des parois, le simple vitrage, les pauvres caractéristiques thermiques de nos bâtiments, nous trouvons cohérents ces résultats. Les résultats pour les quatre autres villes sont fournis en annexe.

PARTIE 5 | SIMULATIONS – ACV

5.1. Données générales concernant le projet

5.1.1. Bâtiment

Nous récupérons les données concernant les métrés des matériaux de construction ainsi que leurs caractéristiques détaillées. De plus, nous récupérons également les données concernant les besoins et consommations d'énergies et d'eau issues de la simulation thermique dynamique.

Il nous reste encore quelques données supplémentaires à renseigner.

5.1.1.1 Données supplémentaires relatives aux matériaux

Grâce à la base de données Ecoinvent 2.2, nous attribuons à chaque équipement et matériau du projet les données relatives à leurs impacts environnementaux. Cependant, les données concernant le traitement en fin de vie de chacun des matériaux utilisés étant absentes, nous considérons pour la suite comme étant tous des déchets inertes mis en décharge.

Pour ce qui est de la durée de vie, nous gardons les données de base proposées par le logiciel à savoir 30 ans pour les portes et fenêtres, 10 ans pour les revêtements, 20 ans pour les équipements spécifiques. Les matériaux structuraux et isolants ont une durée de vie égale à celle du bâtiment, c'est-à-dire 100 ans. Ainsi, nous prenons en compte les impacts liés à la phase de rénovation.

Enfin, nous considérons un surplus de matériaux utilisés sur chantier ; ceci correspond au taux de chute moyen des différents produits de construction. Il est estimé à 5% d'après Servaes et al. (2013).

5.1.1.2 Données énergétiques

Nous introduisons le mix énergétique belge selon les données obtenues sur forumnucleaire.be qui recense les données de ELIA (ELIA, 2016), le gestionnaire de réseau de transport d'électricité en Belgique. Ainsi, pour la Belgique, les chiffres concernant l'année 2016 sont comme suit :

- 61% nucléaire
- 27% gaz naturel
- 12% d'énergies renouvelables

Pour ce qui est de la consommation liée au chauffage et à l'ECS, elle est directement calculée à partir des besoins issus de la simulation thermique

dynamique. Quant au système de production, il s'agit d'une chaudière à condensation standard, fonctionnant au gaz naturel, avec un rendement PCI de 86%.

5.1.1.3 Eau

D'après l'état de l'environnement wallon (etat.environnement.wallonie.be), la consommation moyenne d'eau de distribution d'un ménage pour usage domestique est estimée à 91l/(hab.jour) (2014).

Nous ajoutons les équipements suivants dans le logiciel afin d'avoir une simulation plus précises des consommations.

Chasse d'eau

Utilisation : 4 fois par jour et par personne

Capacité : Double flux 6l/3l

Lavabo

Utilisation : 3 fois une minute par jour et par personne

Débit : 5l/min

Douche

Utilisation : 7 fois 5 minutes par semaine et par personne

Débit : 10l/min

Évier

Utilisation : 4 fois 1 minute par jour et par personne

Débit : 5l/min

Lave-vaisselle

Utilisation : 2 fois par semaine et par logement

Capacité : 12l

Lave-linge

Utilisation : 1 fois par semaine et par logement

Capacité: 60l

Ainsi, les consommations des installations atteignent 100l d'eau par jour et par personne. Les résultats sont comparables avec la moyenne de consommation des ménages wallons citée précédemment.

5.1.1.4. Déchets

Pour la gestion des déchets, nous avons pris en compte le tri sélectif (etat.environnement.wallonie.be) Ainsi, 90% des verres et 75% des papiers, cartons sont triés. De plus, selon les statistiques, parmi les 1500 grammes de déchets journaliers par personne, 40% sont envoyés à l'incinération avec un rendement de 85%.

Par ailleurs, nous prenons en comptes les distances du site par rapport à la décharge (10 km), le site d'incinération (50km) et le site de recyclage (100km).

5.1.1.5. Transports

Le paramètre de la mobilité rarement pris en compte, génère pourtant des impacts environnementaux (Reiter, 2010). C'est pourquoi nous le prenons en compte pour la simulation, l'impact des trajets journaliers des habitants. Dès lors, nous considérons que 80% des habitants effectuent un trajet journalier. Étant en zone urbaine, nous considérons que les différents trajets sont assez courts.

En effet, nous considérons 2 500 m pour le trajet domicile travail, effectué en transport en commun, le bus. Ces trajets sont effectués 5 jours par semaine. Puis nous considérons une distance de 500 m pour le trajet domicile-commerce.

5.1.1.6. Résultats relatifs au scénario de base à l'échelle du bâtiment

Ci-dessous, le tableau 6 reprend les résultats du bâtiment C1

LIEGE BÂTIMENT C1	Valeurs sur 100 ans	Valeur par habitant/an	Valeur par m ² /an
Effet de serre (100 ans)(t CO ₂ eq)	6312,52	2,525	0,046
Acidification (kg SO ₂ eq.)	13118,7	5,247	0,096
Demande cumulative d'énergie (GJ)	166 856,15	66,742	1,222
Eau utilisée (m ³)	197163,82	78,866	1,444
Déchets produits (t)	2394,31	0,958	0,018
Épuisement ressources abiotiques (kg d'antimoine eq.)	56439,04	22,576	0,413
Eutrophisation (kg PO ₄ eq.)	5078,48	2,031	0,037
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	941,35	0,377	0,007
Dommage à la biodiversité (PDF.m ² .an)	134041,07	53,616	0,982
Déchets radioactifs (dm ³)	167,86	0,067	0,001
Dommage à la santé (DALYs)	4,64	0,002	0,000
Odeur (Mm ³ air)	173755,38	69,502	1,273

Tableau 7 : Résultats de l'ACV du bâtiment C1 situé à Liège

Vous trouverez en annexe, les tableaux reprenant les résultats des bâtiments C2, C3 et C4.

Afin de vérifier la conformité des résultats, nous comparons l'ordre de grandeur de nos résultats à ceux des différents ACV réalisées à l'échelle du bâtiment.

5.1.2 Quartier

Lorsque l'ACV de chacun des bâtiments a été calculée, il faut ensuite les assembler pour former un quartier. Dès lors, nous y ajoutons tous les autres impacts qui apparaissent due à la formation du quartier. En effet, nous ajoutons en plus de l'impact des bâtiments construits qui viennent d'être calculés, l'impact de la construction et l'utilisation des équipements publics tels que les réseaux d'eau, l'électricité, etc.... Et enfin, nous ajoutons également l'impact lié aux aménagement des espaces publics (espaces verts, voiries...).

5.1.2.1. Site

Ici, il s'agit de répéter certaines données que nous avons déjà fournies à l'échelle du bâtiment telles que le mix énergétique (qui sera cette fois-ci utilisé pour calculer l'impact de l'électricité consommée par les éclairages publics), les distances de transports entre le site et l'usine, et entre le site et le centre de gestion des déchets.

Nous considérons une pluviométrie de 800 l/m².an. Une partie de l'eau est dirigée vers le réseau tandis que l'autre sera dirigée vers des systèmes de rétention d'eau. Il s'agit d'espaces tampons qui contiennent une partie du volume d'eau en cas de fortes pluies.

Les réseaux enterrés d'eaux potables et d'eaux usées sont pris en compte dans notre analyse. Suite à un métré approximatif, nous estimons à 530 m la longueur de canalisation pour l'eau potable et l'eau usée. Concernant leurs caractéristiques, elles sont composées de 50% de fonte ductile et de 50% de polyéthylène. Les pertes sont estimées à 15%. Concernant la durée de vie de ces matériaux, il s'agit de 100 ans pour la fonte avec un entretien nécessaire tous les 100 ans et 75 ans pour le polyéthylène avec un entretien nécessaire tous les 40 ans. Par ailleurs, pour ce qui est des pertes du réseau d'eaux usées, les pertes sont estimées à 3% et la durée de vie est de 75 ans avec un entretien nécessaire après 40 ans.

5.1.2.2 Bâtiments

Il faut dans cette partie fournir les éléments qui mettent en avant l'impact de la construction des bâtiments du quartier. Ainsi, nous

considérons qu'avant la construction, le terrain s'apparentait à une jachère permanente.

5.1.2.3 Espaces publics

Notre ancien quartier étant situé en zone urbaine, il n'y a malheureusement pas d'espaces verts, les espaces publics sont composés de rues et trottoirs uniquement. En voici les caractéristiques :

Rue

Surface : 2 502 m²

Imperméabilité 95%

Eclairage : Sodium (4.8kWh/m²/an)

Durée de vie 100 ans

Composition : Couche de béton bitumineux (8cm) + mélange gravier/asphalte (14cm) + mélange gravier/béton (22 cm)

Trottoir

Surface : 1977m²

Imperméabilité 90%

Eclairage : Sodium (4.8kWh/m²/an)

Durée de vie 100 ans

Composition : Couche de béton bitumineux (5cm) + mélange gravier/béton (10cm)

Cours intérieures

Surface 859 m² sans espace vert

Imperméabilité 85%

Pas d'éclairage

Durée de vie 100 ans

Composition : Couche de béton (7cm)

De même que pour le bâtiment, nous considérons qu'avant la construction ces surfaces étaient composées de terres en jachères permanentes.

5.1.2.4 . Scénario de base

Le tableau 8 ci-dessous, reprend les résultats de l'ACV du quartier initial localisé à Liège avec toutes les données correspondant à Liège (mix énergétique, gestion des eaux, déchets, etc...)

Impact	Construction	Utilisation	Rénovation	Déconstruction	Total
Effet de serre (100 ans) (t CO2 eq.)	1 191.44	26 362.50	209.69	50.27	27 813.90
Acidification (kg SO2 eq.)	4 317.84	42 058.24	1 319.59	360.02	48 055.69
Demande cumulative d'énergie(GJ)	18 712.15	543 715.79	5 586.78	1 223.78	569 238.49
Eau utilisée (m3)	5 988.84	720 393.78	2 184.42	875.12	729 442.16
Déchets produits (t)	459.52	5 852.16	621.93	4 684.46	11 618.03
Epuisement ressources abiotiques (kg d'antimoine eq.)	7 414.45	185 500.69	2 261.98	527.03	195 704.14
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	1 118.77	19 423.70	409.05	72.01	21 023.53
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	231.04	2 913.37	73.25	10.50	3 228.16
Dompage à la biodiversité (PDF.m2.an)	22 782.57	2 388 005.56	8 614.92	992.26	2 420 395.31
Déchets radioactifs (dm3)	7.61	575.57	2.15	0.21	585.54
Dompage à la santé (DALYs)	2.36	15.10	0.31	0.08	17.84
Odeur (Mm3 air)	17 506.15	596 122.53	2 374.32	1 885.43	617 888.43

Tableau 8: Résultats de l'ACV à l'échelle du quartier initial, localisé à Liège

Le rapport des résultats plus détaillés est fourni en annexe.

5.1.2.5. Analyse des résultats et validation

Afin de vérifier la cohérence des résultats obtenus, nous allons comparer les valeurs obtenues avec ceux présents dans la littérature scientifique. Plus particulièrement, nous allons nous référer à l'article de Lotteau et al. (2015) qui effectue une revue critique de l'état de l'art sur l'ACV à l'échelle du quartier. En effet, voici les graphiques qu'il en a ressorti, dont nous allons nous servir pour la comparaison :

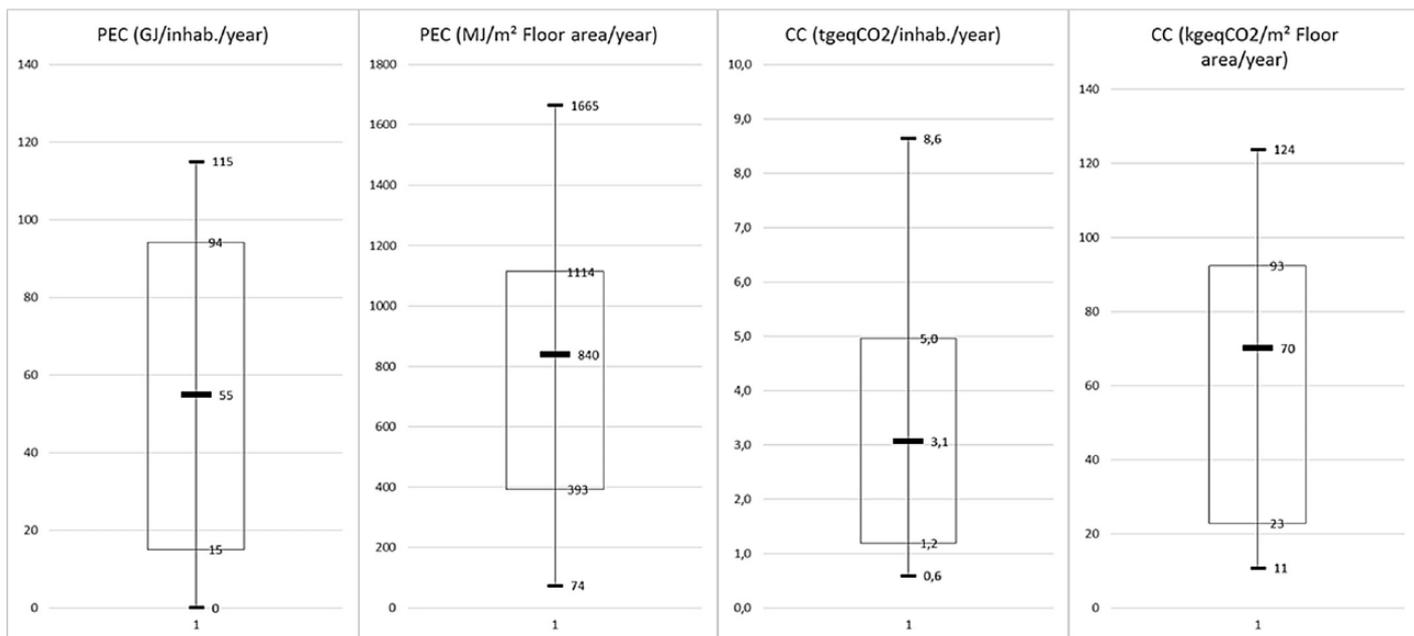


Figure 9 : Consommation d'énergie primaire et changement climatique; min, Q1, median, Q3 et valeurs maximales (Lotteau et al., 2015)

En comparant les résultats, nous remarquons que nos résultats se situent entre les premiers et troisièmes quartiles des graphiques proposés par Lotteau et al. (2015). Cependant, nous remarquons également que l'étendue des valeurs est très grande et donc par conséquent, nous devons continuer à vérifier nos valeurs pour confirmer qu'elles restent encore cohérentes.

Par ailleurs, les résultats exposés dans le tableau 9 viennent appuyer les conclusions que nous avons émises lors de l'état de l'art. En effet, c'est la phase opérationnelle (utilisation + rénovation) qui prédomine les deux autres phases sauf lorsqu'il s'agit de l'impact concernant les déchets produits où là, la phase de déconstruction devient comparable à celle opérationnelle.

Impact	Construction	Opérationnelle	Déconstruction	Total
Effet de serre (100 ans) (t CO2 eq.)	4,3	95,5	0,2	100,0
Acidification (kg SO2 eq.)	9,0	90,3	0,7	100,0
Demande cumulative d'énergie(GJ)	3,3	96,5	0,2	100,0
Eau utilisée (m3)	0,8	99,1	0,1	100,0
Déchets produits (t)	4,0	55,7	40,3	100,0
Epuisement ressources abiotiques (kg d'antimoine eq.)	3,8	95,9	0,3	100,0
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	5,3	94,3	0,3	100,0
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	7,2	92,5	0,3	100,0
Domage à la biodiversité (PDF.m2.an)	0,9	99,0	0,0	100,0
Déchets radioactifs (dm3)	1,3	98,7	0,0	100,0
Domage à la santé (DALYs)	13,2	86,4	0,4	100,0
Odeur (Mm3 air)	2,8	96,9	0,3	100,0

Tableau 9 : Pourcentage de contribution de chaque phase dans l'impact environnemental pour le quartier localisé à Liège

PARTIE 6 | IMPACT DU CLIMAT

Dans cette partie, nous allons garder les mêmes caractéristiques concernant les bâtiments et le quartier (bâtiments, mix énergétique, traitement des eaux, traitement des déchets etc...). Nous modifierons seulement les données climatiques correspondant à la France, l'Espagne et la Suède. Nous analyserons dans un premier temps les résultats de l'analyse thermique dynamique puis ceux de l'ACV.

6.1 Analyse de la STD

Après avoir modifié seulement les données climatiques pour chaque ville, voici dans le tableau ci-dessous, les besoins de chauffage pour chaque bâtiment positionné dans chacune des villes.

Bâtiments	Besoins de chauffage kWh/m2.an			
	Liège	Lyon	Barcelone	Stockholm
C1	101	85	23	134
C2	112	95	27	149
C3	118	97	19	159
C4	130	110	30	172
Moyenne	112,5	94,76	25,22	149,64

Tableau 10 : Résultats de la STD: cas initial

Ainsi, avec les mêmes données de construction, un bâtiment se situant dans une zone géographique et ainsi une zone climatique différente, voit ses besoins de chauffage changer. D'après les résultats, les besoins de chauffage sont moins élevés à Barcelone, puis Lyon, Liège et enfin Stockholm. En effet, plus le bâtiment se situe dans une zone climatique chaude, plus les besoins de chauffage sont faibles, ce qui semble être logique.

Par ailleurs, les résultats nous montrent que l'écart peut être très important. En effet, il existe un écart de 124,22 kWh/m2.an entre Barcelone et Stockholm par exemple. Cet écart représente 1,1 fois le besoin de chauffage si le bâtiment était placé à Liège et 1,3 fois le besoin de chauffage si celui-ci était placé à Lyon.

Ainsi, nous remarquons que le climat a un fort impact sur les besoins de chauffage, d'où l'importance d'une isolation adaptée.

6.2 Analyse de l'ACV

Nous allons maintenant analyser les résultats de l'ACV. Pour toutes les prochaines analyses, l'impact de chaque paramètre pour chaque ville est exprimé relativement au cas référent ; c'est-à-dire Liège. Ainsi les valeurs affichées sont exprimées en pourcentage par rapport aux valeurs de Liège qui sont donc toujours à 100%.

Comme précédemment, seuls les données climatiques changent, toutes les autres données restent identiques.

Voici dans le diagramme barre ci-dessous, l'influence du climat dans l'impact environnemental de chaque paramètre dans l'ACV du quartier selon chaque ville.

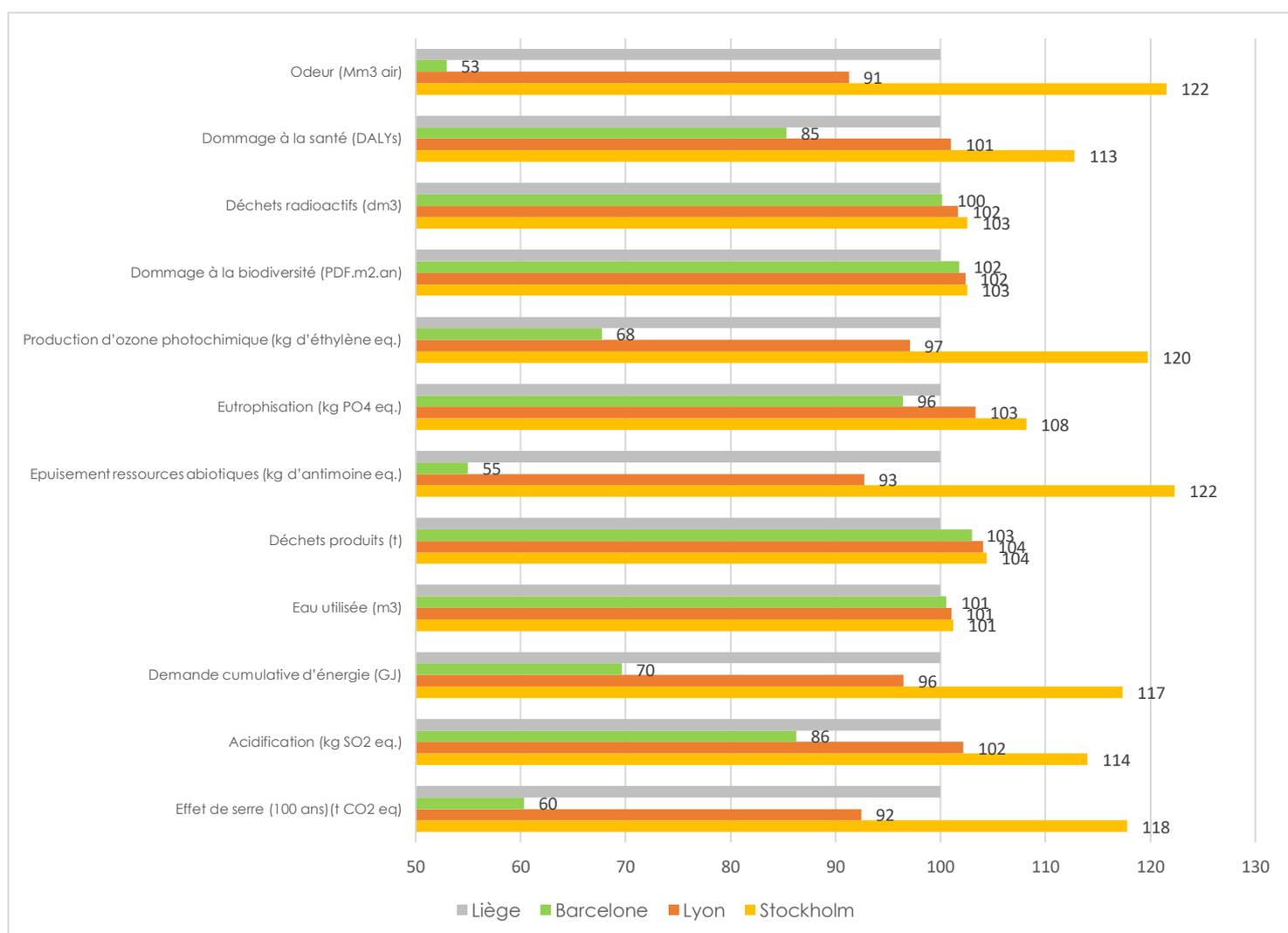


Figure 10 : Influence du climat dans l'ACV

Nous remarquons de manière générale qu'une fois que tous les impacts à l'échelle du quartier sont comptabilisés, les résultats sont hétérogènes entre les villes sauf pour Liège et Lyon, où ils restent assez similaires.

En revanche un grand écart est visible entre Stockholm et Liège et Barcelone et Liège. Ces écarts sont représentatifs des écarts que nous avons précédemment observés lors des résultats de la STD. En effet, Stockholm ayant un besoin de chauffage beaucoup plus important que les trois autres villes, inévitablement elle nécessite plus de consommation des ressources et génère donc plus de dommage à l'environnement.

Nous remarquons que les résultats pour les indicateurs : déchets radioactifs, dommage à la biodiversité, déchets produits et eau utilisée semblent similaires. Nous pouvons supposer dans un premier temps que le climat n'influence pas ces paramètres.

En revanche, les indicateurs : odeur, dommage à la santé, production d'ozone photochimique, épuisement des ressources abiotiques, demande cumulative d'énergie acidification et effet de serre présentent des disparités entre les villes.

En effet, l'épuisement des ressources abiotiques est 45% moins important à Barcelone qu'à Liège, et 22% plus important à Stockholm qu'à Liège. L'effet de serre est 40% moins important à Barcelone qu'à Liège et 18% plus important à Stockholm qu'à Liège. La demande cumulative d'énergie est 30% moins important à Barcelone qu'à Liège, et 14% plus important à Stockholm qu'à Liège.

Ainsi, les villes ayant un besoin de chauffage moins important semblent engendrer moins d'impacts environnementaux. Nous pouvons alors supposer dans un premier temps que l'impact sur l'environnement est plus faible dans les climats les plus chauds.

PARTIE 7 | IMPACT DE LA RENOVATION

Nous venons de voir l'influence du climat sur l'ACV et avons remarqué une tendance selon laquelle les impacts sont moins importants dans les climats les plus chauds, car le chauffage qui est un grand poste de consommation d'énergie génère parallèlement beaucoup d'impact. D'où l'importance d'une bonne isolation. Nous allons dans cette partie évaluer différents scénarios de rénovation afin d'analyser leur impact dans l'ACV.

Dans le scénario initial, une isolation de 20 cm de la toiture est déjà considérée. Nous allons dans cette partie évaluer l'impact du remplacement des châssis, l'isolation des parois puis la combinaison des deux scénarios.

7.1. Remplacement des châssis

En repartant du cas initial, nous allons maintenant supposer qu'un remplacement des châssis est effectué. En effet, nous choisissons des châssis plus performants, nous remplaçons le simple vitrage par du double vitrage et nous remplaçons les portes simples par des portes isolantes. Toutes les caractéristiques sont fournies en annexe 2.

7.1.1. Analyse de la STD

Voici dans le tableau 10 ci-dessous, les résultats de la STD suite au remplacement des châssis, du vitrage et des portes.

Bâtiments	Besoins de chauffage kWh/m ² .an			
	Liège	Lyon	Barcelone	Stockholm
C1	84	65	18	112
C2	89	69	19	120
C3	94	70	13	120
C4	107	83	22	143
Moyenne	91,29	70,37	18,44	121,58

Tableau 11 : Résultats de la STD après le remplacement des châssis

Nous remarquons que le remplacement des châssis a eu un impact considérable sur les besoins de chauffage qui ont très fortement diminué. En effet, les besoins de chauffage pour Liège se sont réduits de 18,9% ; pour Lyon, de 25,7% ; Barcelone, de 26,9% et Stockholm, de 18%.

7.1.2. Analyse de l'ACV

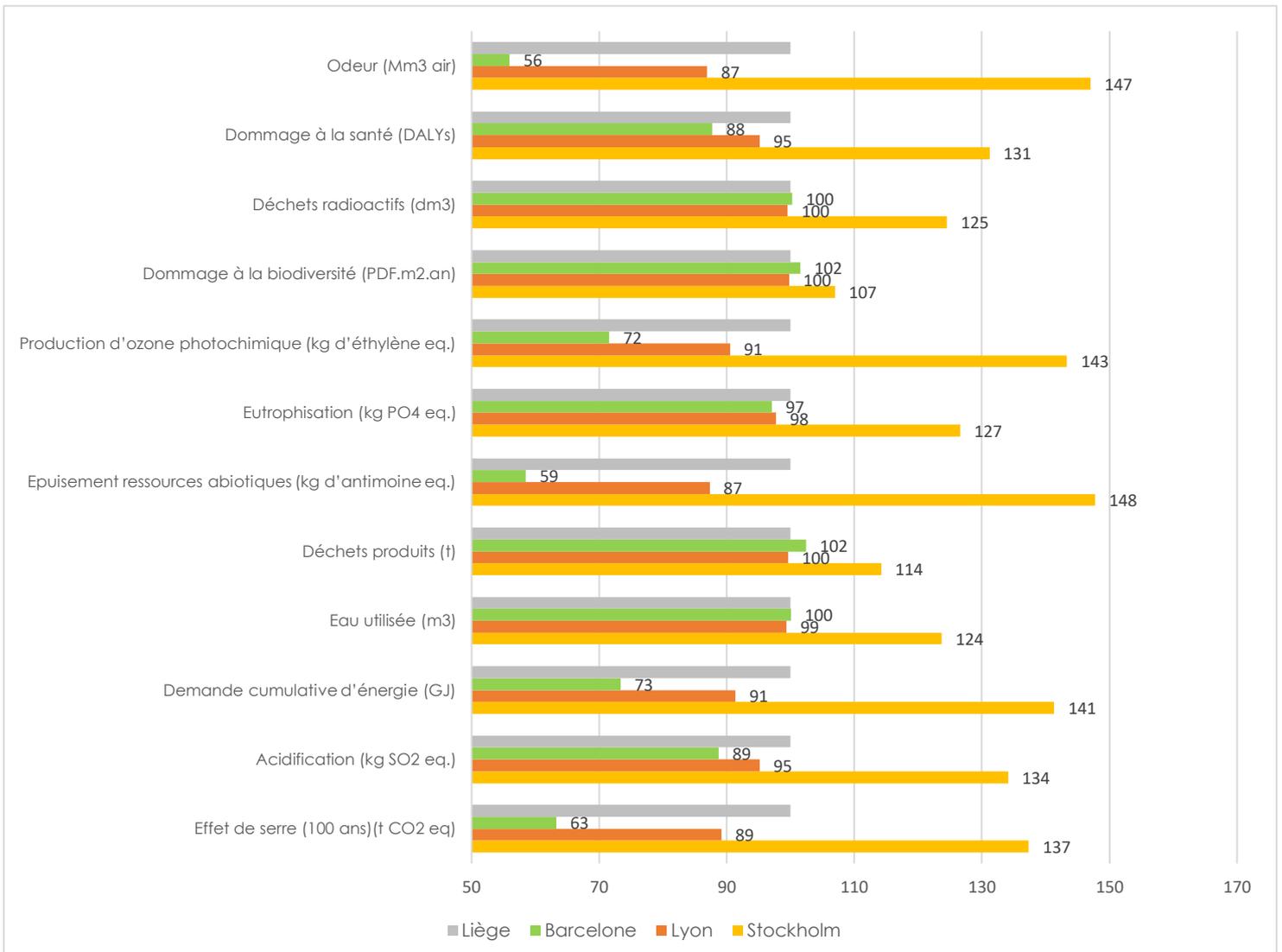


Figure 11 : Influence du climat sur l'impact du remplacement des châssis dans l'ACV

Comme dans le cas du scénario initial, nous remarquons que les résultats pour les indicateurs : déchets radioactifs, dommage à la biodiversité semblent similaires. Nous pouvons supposer que le climat n'a pas d'impact sur ces indicateurs.

La relation inverse entre impact environnemental et la température moyenne de la région étudiée semble se confirmer de nouveau dans ce scénario alternatif. Les climats les moins chauds semblent en effet générer plus de dommages environnementaux.

L'écart des résultats dans ce cas-ci est encore plus grand que le cas précédent. En effet, pour l'indicateur odeur par exemple, l'impact est 44% moins important à Barcelone, qu'à Liège et 47% plus important à Stockholm qu'à Liège. Les valeurs pour Lyon sont environ 10% moins important qu'à Liège pour chaque indicateur où les résultats sont très différents pour chaque ville.

Analysons maintenant l'impact du remplacement des châssis pour chaque ville. La figure ci-dessous représente en bleu le cas initial pour chaque ville. Ainsi, les valeurs pour chaque ville données par les autres légendes de couleurs sont comparées à leur propre situation initiale.

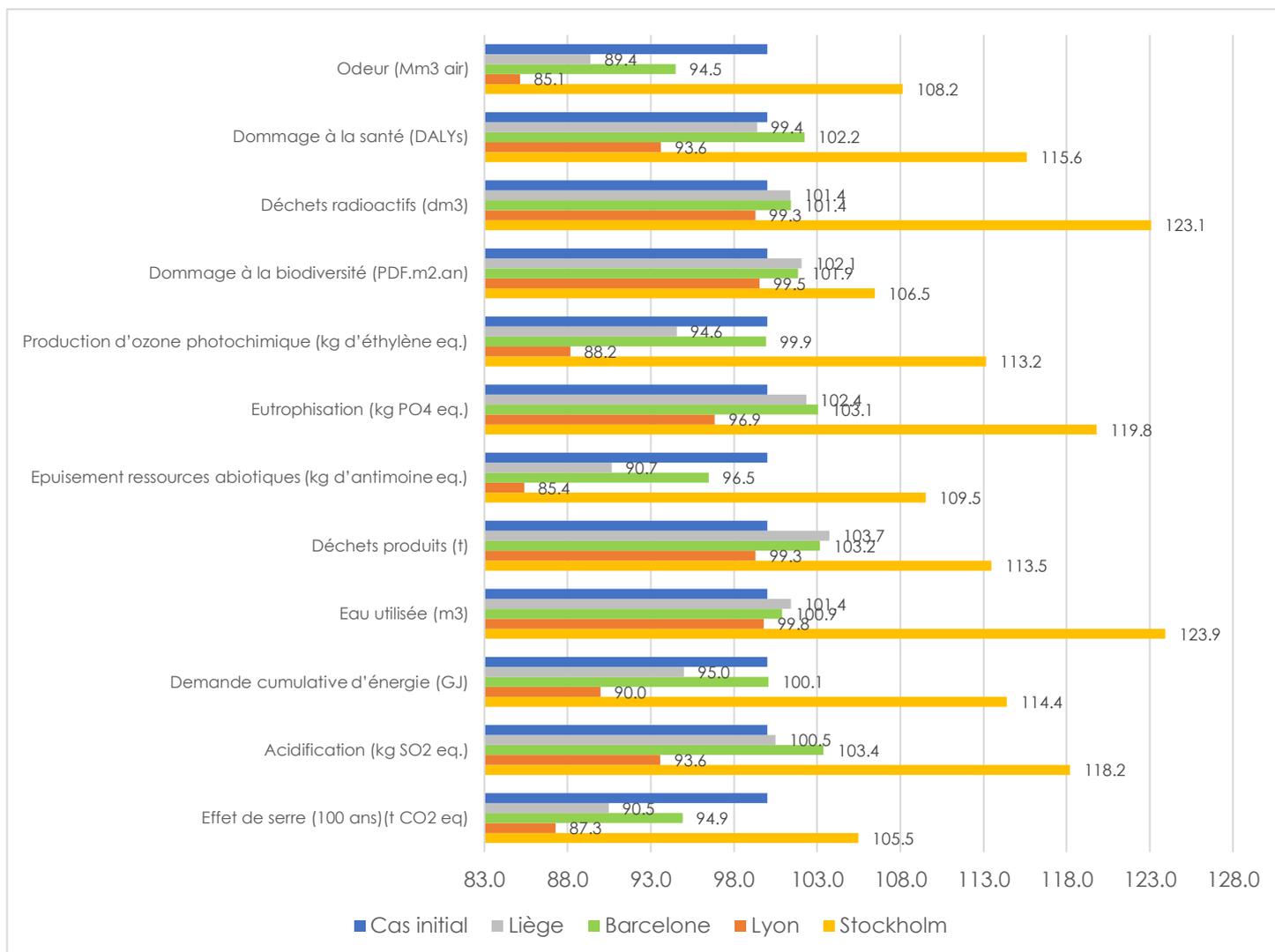


Figure 12 : Impact du remplacement des châssis dans l'ACV

Nous remarquons que les résultats sont très hétérogènes. Intuitivement, nous nous attendions à une diminution des impacts dû à la diminution des besoins énergétiques. A part pour Lyon où l'impact de tous les indicateurs sont réduits, celui des autres ville est soit partagée (Liège , Barcelone) soit il augmente. En effet, pour Liège et Barcelone, cette rénovation augmente légèrement les indicateurs suivants : déchets radioactifs, domage à la biodiversité, eutrophisation, déchets produits, eau utilisée et acidification.

Par rapport à la situation initiale de Stockholm cette rénovation n'a fait qu'augmenter son impact environnemental. Près de 24% d'eau en plus est utilisée durant la phase d'utilisation essentiellement, 23% de déchets radioactifs de plus produits pendant la phase d'utilisation également due à

la consommation électrique et plus de 13% de déchets et d'ozone photochimiques en plus sont produits. Nous ne trouvons pas d'explication cohérente pour ces résultats à ce stade-ci.

7.2. Isolation des parois

Les besoins de chauffage des bâtiments restant encore trop élevés, nous allons maintenant appliquer une rénovation plus lourde afin de diminuer ceux-ci pour les rapprocher des critères de bâtiments basses consommations puis, nous analyserons l'impact environnemental de cette rénovation.

Pour cela, nous entreprenons de sérieux travaux de rénovation et isolons toutes les parois des bâtiments. Le détail de la rénovation est fournie en annexe.

Nous allons dans un premier temps analyser les résultats de la STD puis ceux de l'ACV.

7.2.1. Analyse de la STD

Bâtiments	Besoins de chauffage kWh/m2.an			
	Liège	Lyon	Barcelone	Stockholm
C1	33	26	4	46
C2	42	34	7	69
C3	40	31	2	59
C4	45	36	6	63
Moyenne	39,4	31,41	5,21	59,26

Tableau 12 : Résultats de la STD après l'ajout d'isolant sur les parois

Comme le montre ces résultats, l'isolation des parois a très fortement diminué les besoins de chauffage de nos bâtiments. Par rapport à la situation initiale, les besoins en chauffage ont diminué de 64% pour Liège, 67% pour Lyon, 79% pour Barcelone et 60% pour Stockholm. Ces résultats témoignent bien de l'importance d'une bonne isolation pour faire des économies d'énergies.

7.2.2. Analyse de l'ACV

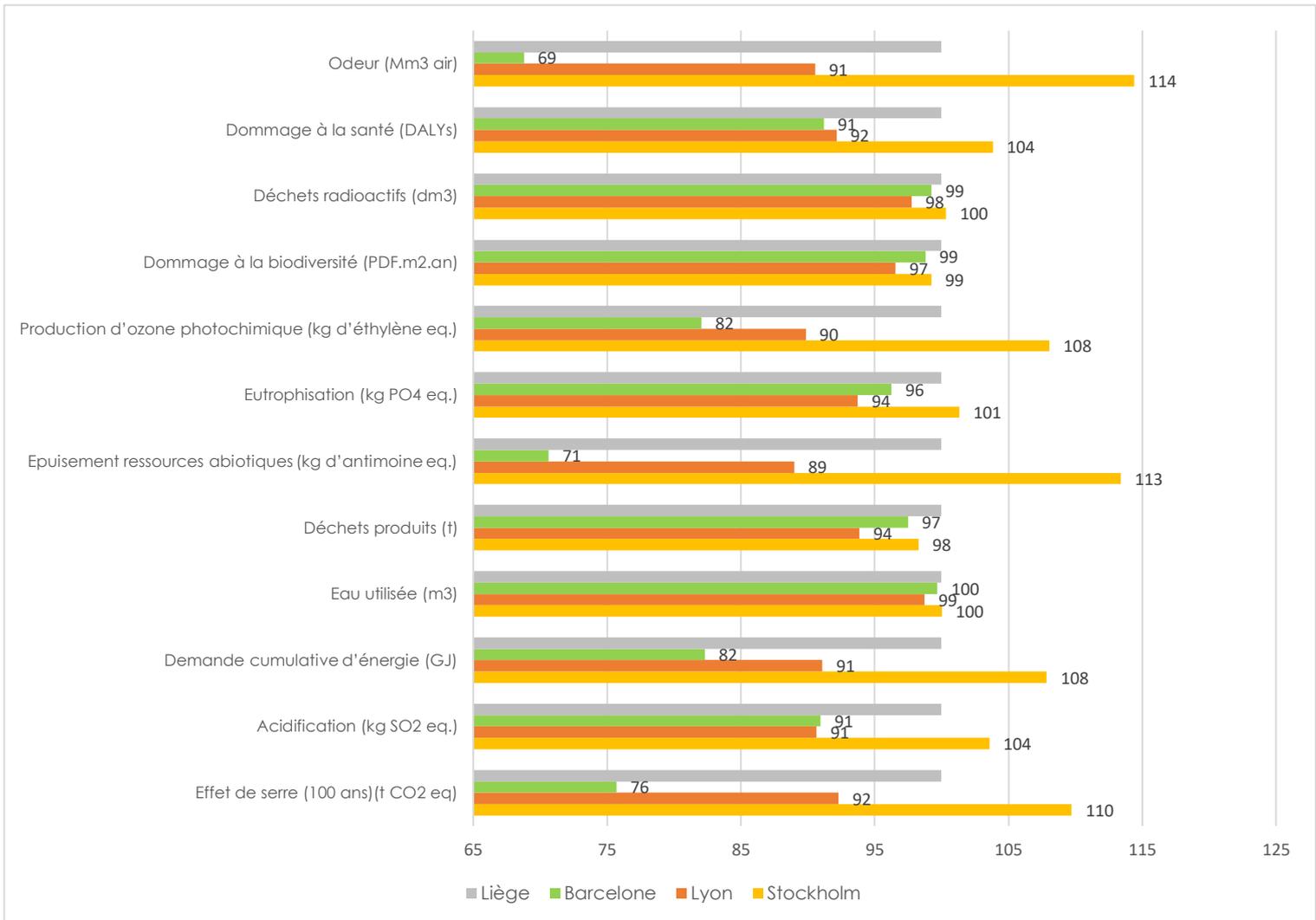


Figure 13 : Influence du climat sur l'impact de l'isolation des parois dans l'ACV

Les résultats pour les déchets radioactifs, les dommages à la biodiversité et l'eau utilisée semble similaires. Nous pouvons supposer que le climat n'a pas d'influence sur ces indicateurs.

Ensuite, nous remarquons que l'impact des toutes les villes sauf Stockholm sont moins importantes que Liège. Une fois de plus, comme l'a montré la STD, les besoins de chauffage pour Stockholm restent bien supérieurs à ceux des autres.

Cependant, nous remarquons qu'alors que Barcelone a des besoins de chauffage bien inférieur par rapport à Lyon, pour les indicateurs déchets radioactifs, dommage à la biodiversité, eutrophisation, déchets produits et eau utilisée, son impact est très légèrement supérieur. Parmi ces indicateurs nous en distinguons trois que nous avons déjà cités et supposé qu'ils pouvaient être indépendant du climat.

Il y a cependant cinq indicateurs pour lesquels les résultats divergent. En effet, pour l'effet de serre Barcelone a un impact de 24% de moins que Liège et Lyon, 8% de moins. Alors que Stockholm impacte 10% de plus que Liège. Les odeurs, la production d'ozone photochimique, l'épuisement des ressources abiotiques et la demande cumulative d'énergie sont les autres indicateurs concernés. A part l'odeur, ces quatre indicateurs sont tous liés à l'environnement.

Comparons maintenant les résultats pour chaque ville.

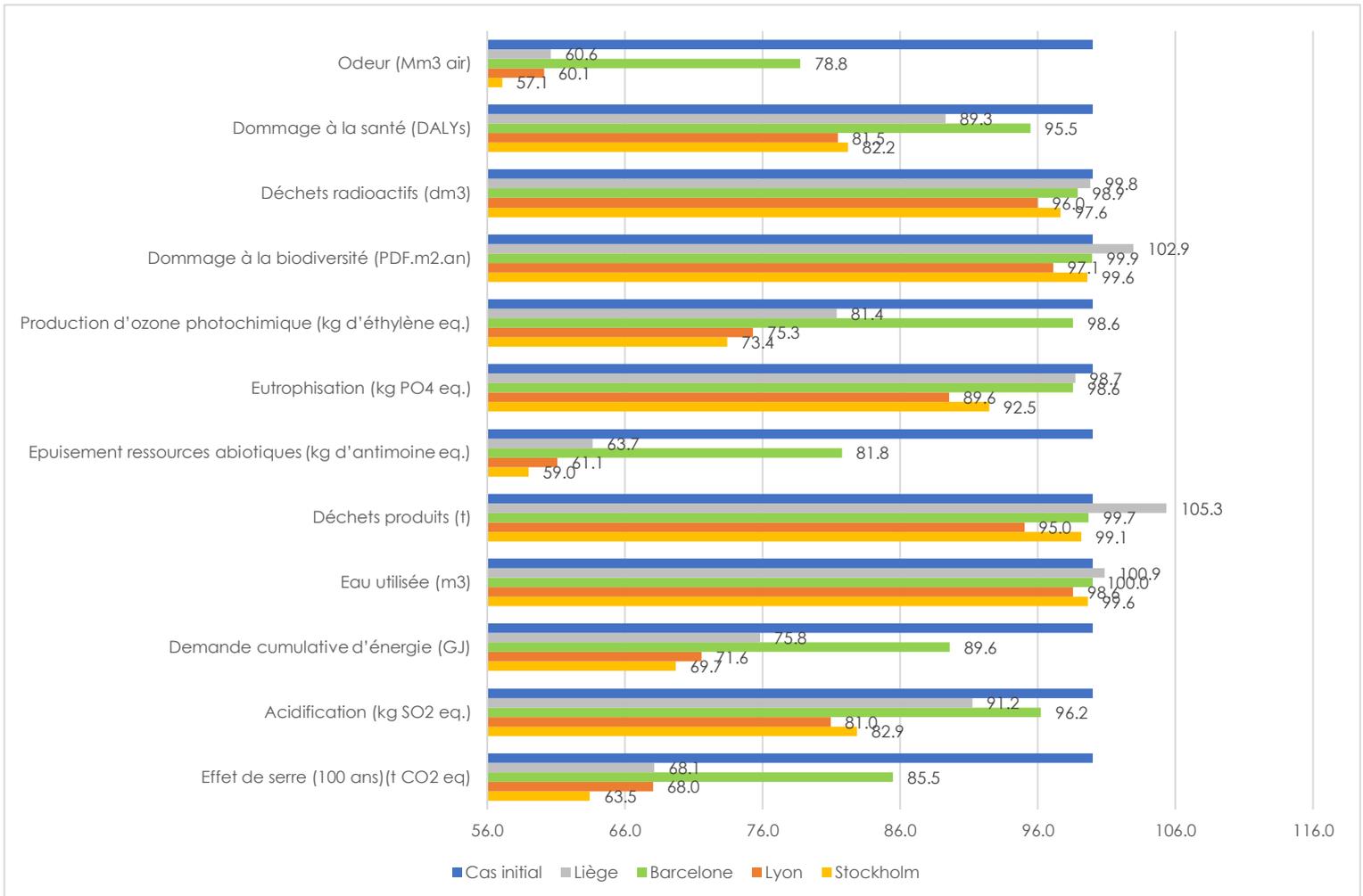


Figure 14 : Influence de l'isolation des parois

Les résultats semblent cohérents. En effet, Stockholm ayant le plus réduit ses besoins de chauffage, c'est elle qui diminue le plus ses impacts par rapport à la situation initiale sauf pour les indicateurs : déchets radioactifs, dommage à la biodiversité, eutrophisation, déchets produits et eau utilisée. Parmi ces indicateurs, trois sont supposés ne pas être influencés par l'environnement, donc les autres villes peuvent pour d'autres raisons avoir diminué plus que Stockholm ces indicateurs par rapport à leur situation initiale. D'autant plus que ces valeurs sont des données relatives, en termes de quantité propre, Stockholm est la ville qui diminue le plus son impact.

Ensuite, de manière générale, l'effet de serre, la demande cumulative d'énergie, l'épuisement des ressources abiotiques, et l'odeur sont les indicateurs qui ont été le plus réduit pour toutes les villes.

7.3. Combinaison des deux scénarios de rénovation

Nous allons à présent combiner les deux scénarios précédents afin d'analyser leurs impacts dans l'ACV.

7.3.1. Analyse de la STD

Bâtiments	Besoins de chauffage kWh/m ² .an			
	Liège	Lyon	Barcelone	Stockholm
C1	15	12	1	24
C2	19	14	1	30
C3	17	12	0	28
C4	22	17	1	33
Moyenne	18	13,64	0,87	28,36

Tableau 13 : Résultats de la STD après l'ajout d'isolant sur les parois et le remplacement des châssis

Par rapport à la situation initiale, cette rénovation a permis de diminuer les besoins de chauffage de 84% pour Liège, 85% pour Lyon, 96% pour Barcelone et 81% pour Stockholm. A Lyon et Barcelone, les moyennes sont inférieures à 15 kWh/m².an, les bâtiments rentrent même dans les critères du passif.

7.3.2. Analyse de l'ACV

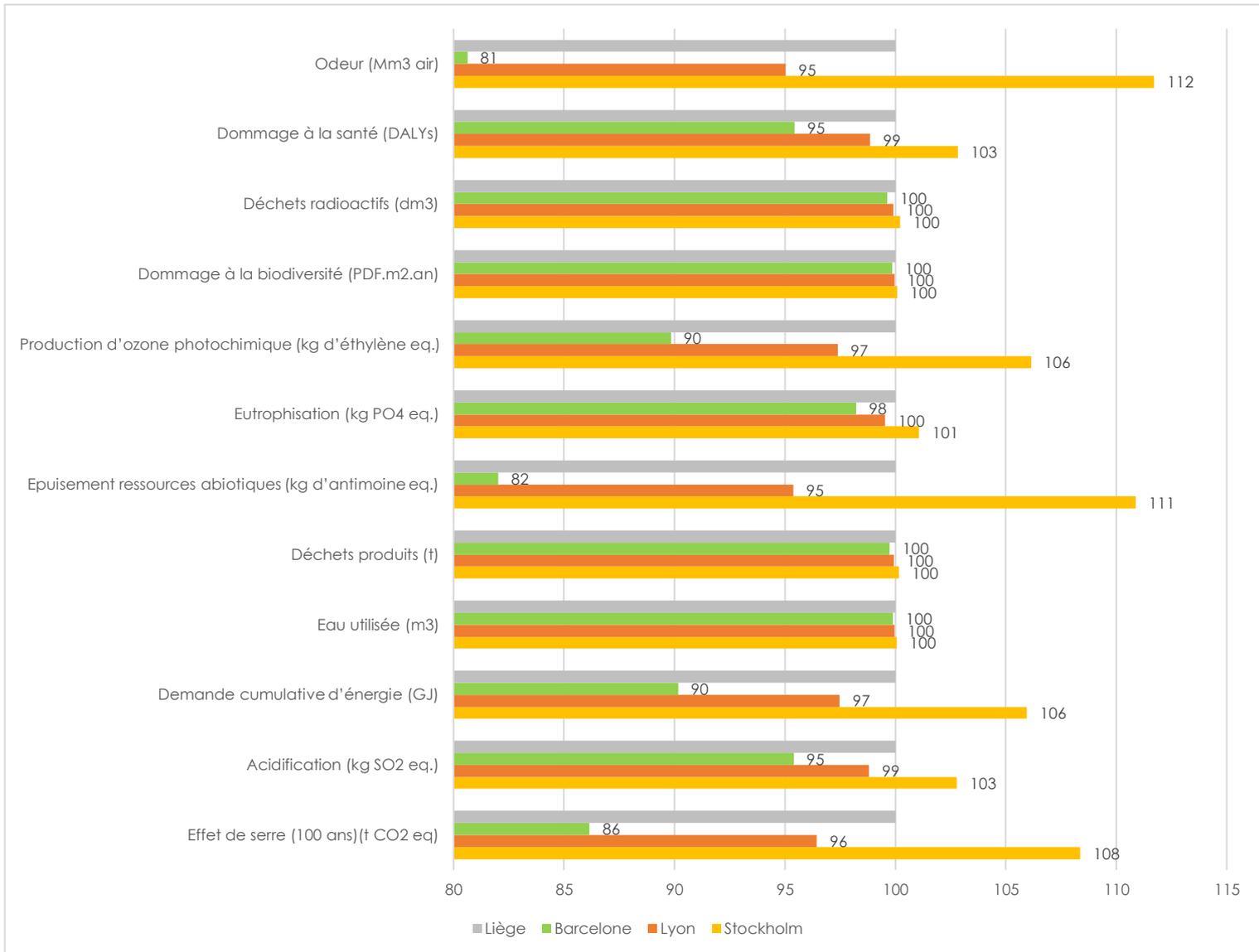


Figure 15 : Influence du climat sur l'isolation des parois et le remplacement des châssis

Les résultats pour les indicateurs déchets radioactifs, dommage à la biodiversité, déchets produits et eau utilisées sont identiques. Nous pouvons supposer que le climat n'influence pas ces paramètres.

Cependant, les résultats sont très hétérogènes pour les indicateurs suivants : effet de serre (Barcelone génère 14% d'impact de moins que Liège, Lyon 4% et Stockholm 8% de plus que Liège), épuisement des ressources abiotiques (Barcelone 18% de moins que Liège, Lyon 5% seulement et Stockholm, 11% de plus que Liège), la production d'ozone photochimique (Barcelone 10% de moins, Lyon 3% de moins et Stockholm 6% de plus que Liège) et enfin l'odeur (Barcelone 19% de moins, Lyon 5% de moins et Stockholm 12% de plus que Liège). Ces indicateurs semblent donc être influencés par le climat.

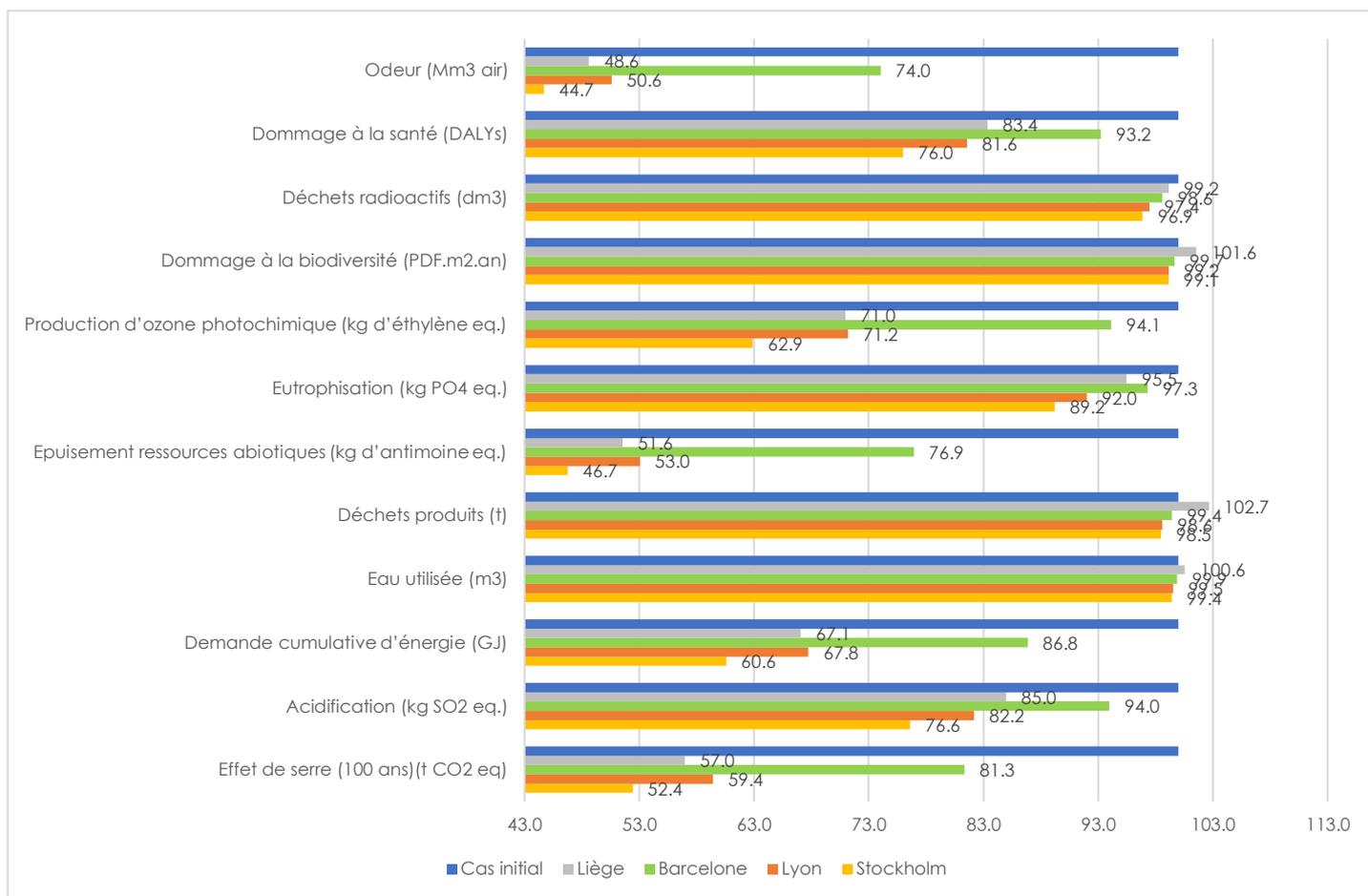


Figure 16 : Impact de l'isolation des parois et le remplacement des châssis

Les indicateurs : déchets radioactifs, dommages à la biodiversité, déchets produits et eau utilisée varient très peu pour toutes les villes. Nous pouvons supposer que ce scénario n'a pas vraiment eu d'impact sur ces indicateurs. En revanche, nous remarquons que l'odeur est très fortement influencée par ce scénario. Peut-être qu'avec l'isolation des parois, les odeurs se déplacent moins et sont donc moins détectées par rapport à la situation initiale.

L'impact de l'épuisement des ressources abiotiques, la demande cumulative d'énergie, la production d'ozone photochimique et l'effet de serre ont fortement diminué pour Stockholm, Lyon et Liège de même pour Barcelone mais avec un écart moins élevé. Ces indicateurs sont liés à l'environnement, car de nouveau les besoins de chauffage ont diminué, il est évident que moins d'énergie est utilisée et ainsi moins de ressources sont puisées et émises dans l'environnement.

PARTIE 8 | IMPACT DU MIX ENERGETIQUE

Nous allons dans cette partie nous intéresser au mix énergétique de chaque pays. En effet, nous avons effectué les simulations précédentes en appliquant le mix énergétique de la Belgique pour chacun des pays. Puis nous augmenterons le taux d'énergie renouvelable de chaque pays pour atteindre celui de la Suède qui possède le plus fort pourcentage d'énergie renouvelables.

Avant de commencer, nous précisons que le logiciel permet la prise en compte de cinq sources d'énergie : le nucléaire, l'hydraulique, le gaz naturel, le charbon et le fioul. N'existant pas de catégorie énergies renouvelables, nous affecterons toutes les autres sources d'énergies renouvelables dans la catégorie « hydraulique ».

8.1. Modification du mix énergétique pour chaque pays

Rappelons maintenant, le mix énergétique considéré pour la Belgique provenait des sources de l'ELIA (ELIA, 2016), le gestionnaire du réseau de transport d'électricité en Belgique. Avec une perte de 5% provenant des réseaux, les chiffres pour 2016 étaient comme suit :

- 61% nucléaire
- 27% gaz naturel
- 12% hydraulique

Pour la France, nous nous sommes renseignés auprès du réseau de transports de l'électricité (RTE, 2016).

Il y a 9% de pertes réseaux. Les chiffres 2016 pour la France, sont les suivants :

- 72,3% nucléaire
- 19.1% hydraulique
- 6.6% gaz naturel
- 1.4% charbon
- 0.6 % fioul

Pour l'Espagne nous avons consulté les données de la « Red Electrica de Espana » (RED, 2016)

Les pertes du réseau sont de l'ordre de 10%. Les chiffres 2016 sont les suivants :

- 21.4% nucléaire
- 50.6% hydraulique
- 2.6% gaz naturel
- 14.3% charbon
- 11.1 % fioul

Enfin, pour la Suède, les pertes du réseau s'élèvent à 5% et voici les chiffres obtenus pour 2016 depuis la « Swedish Energy Agency » (SEA, 2016) :

- 99.6% hydraulique
- 0.4% fioul

8.1.1 Analyse de l'ACV

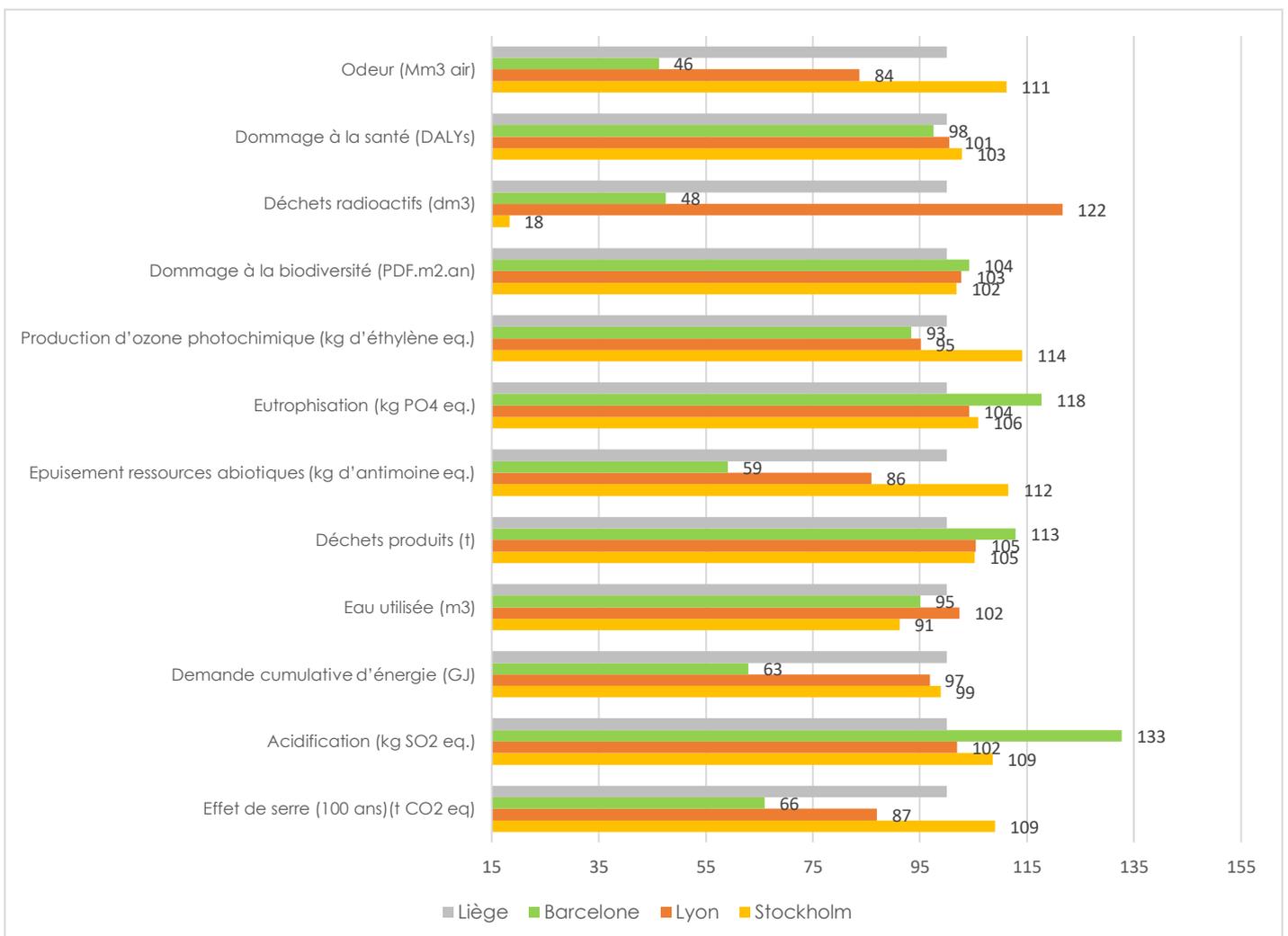


Figure 17 : Impact du mix énergétique sur l'ACV

Nous remarquons globalement que les résultats semblent être hétérogènes pour quasiment tous les impacts sauf ceux concernant les

dommages à la santé et à la biodiversité, l'eutrophisation, les déchets produits et l'eau utilisée.

Les résultats pour Liège et Lyon semblent toutefois comparables.

Parmi les résultats qui se détachent vraiment, nous remarquons qu'au niveau de l'impact déchets radioactifs, Lyon produit 22% de déchets de plus que Liège, Barcelone en produit 52% de moins et Stockholm 82% de moins que Liège. Clairement nous voyons ici l'impact de l'utilisation de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique. Rappelons-le, la France puise presque trois quart de son énergie dans le nucléaire alors que Stockholm ne l'utilise pas du tout par exemple.

Une autre valeur qui se détache des autres, concerne l'impact acidification. En effet, cet impact génère 33% de déchets en plus à Barcelone, qu'à Liège. Alors qu'il est comparable entre les deux autres villes et Liège. Nous pouvons expliquer cet écart en regardant le mix énergétique de Barcelone. Il présente environ 25% d'énergie fossile alors qu'elle ne dépasse pas 2% pour les autres villes. Ainsi, l'émissions de certaines particules provenant des énergies fossiles est à l'origine de cette acidification.

Concernant l'impact effet de serre, nous remarquons qu'il est le plus important à Stockholm. Nous rappelons que les besoins en chauffage de Stockholm étaient les plus importants. Or, le mix énergétique de Stockholm est quasiment propre. Nous ne parvenons donc pas à expliquer cette valeur. Pour Barcelone qui présente le plus de parts d'énergie fossile dans son mix, nous nous attendrions qu'elle soit la ville ayant l'impact « effet de serre » le plus important. Au contraire, son impact est la plus faible, nous expliquons cela par l'avantage du climat qui diminuent considérablement les besoins énergétiques des bâtiments.

8.2. Augmentation du taux d'énergie renouvelable

Dans ce cas, nous repartons du cas initial et changeons le mix énergétique de toutes les villes par celui de Stockholm qui présente la plus grande partie, presque l'entièreté même de son mix en énergie renouvelable.

8.2.1 Analyse de l'ACV

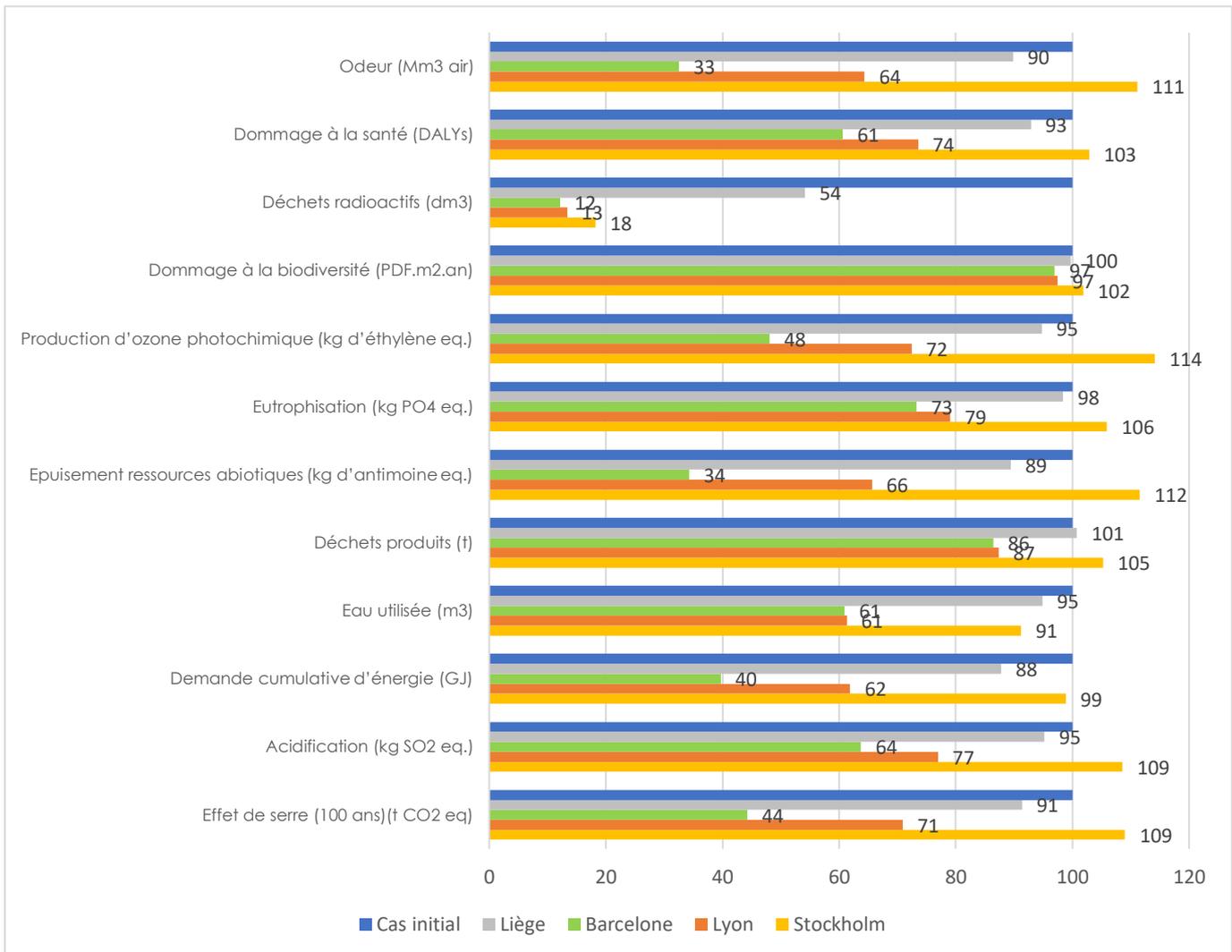


Figure 18 : Influence du climat sur l'impact de l'augmentation du taux d'énergie renouvelable sur l'ACV

Sur le graphique ci-dessus, est représenté en bleu le cas initial du quartier implanté à Liège avec le mix énergétique belge. Le reste de la légende correspond aux quatre villes avec le mix énergétique de la Suède.

Le premier élément marquant est clairement l'impact concernant les déchets radioactifs. En effet, Liège diminue presque de moitié son impact, quant aux trois autres villes, elles diminuent de plus de 80% leurs impacts radioactifs. Ceci est cohérent puisque le mix énergétique de la Suède ne contient pas d'énergie nucléaire.

Ensuite, nous remarquons que seul les impacts de Stockholm dépassent ceux du cas initial. De même que dans la partie précédente, le climat à Stockholm étant plus défavorable qu'à Liège, les besoins de chauffage et donc de consommation d'énergie sont plus élevés. La Source

d'énergie pourtant bien plus propre ne suffirait peut être pas pour compenser cet écart.

Nous observons également que systématiquement, Barcelone est la ville qui génère le moins d'impact pour tous les indicateurs confondus. Ceci nous permet de souligner donc l'influence du climat sur l'ACV.

Enfin l'indicateur « eau utilisée » retient notre attention. En effet, nous remarquons que l'impact pour Barcelone et Lyon diminue de 39% par rapport au cas initial alors que les résultats pour Liège et Stockholm restent comparables au cas initial. Nous ne trouvons pas d'explication cohérente expliquant ce résultat.

Globalement, nous remarquons que les résultats restent similaires seulement pour l'indicateur déchets radioactifs. Nous pouvons donc supposer que le climat a une influence sur tous les autres paramètres.

Analysons maintenant l'impact de l'augmentation des énergies renouvelables à proprement parlé. Nous comparons dans la figure ci-dessous l'état initial de chaque ville ayant le mix énergétique belge avec l'état de chaque ville passant au mix énergétique suédois.

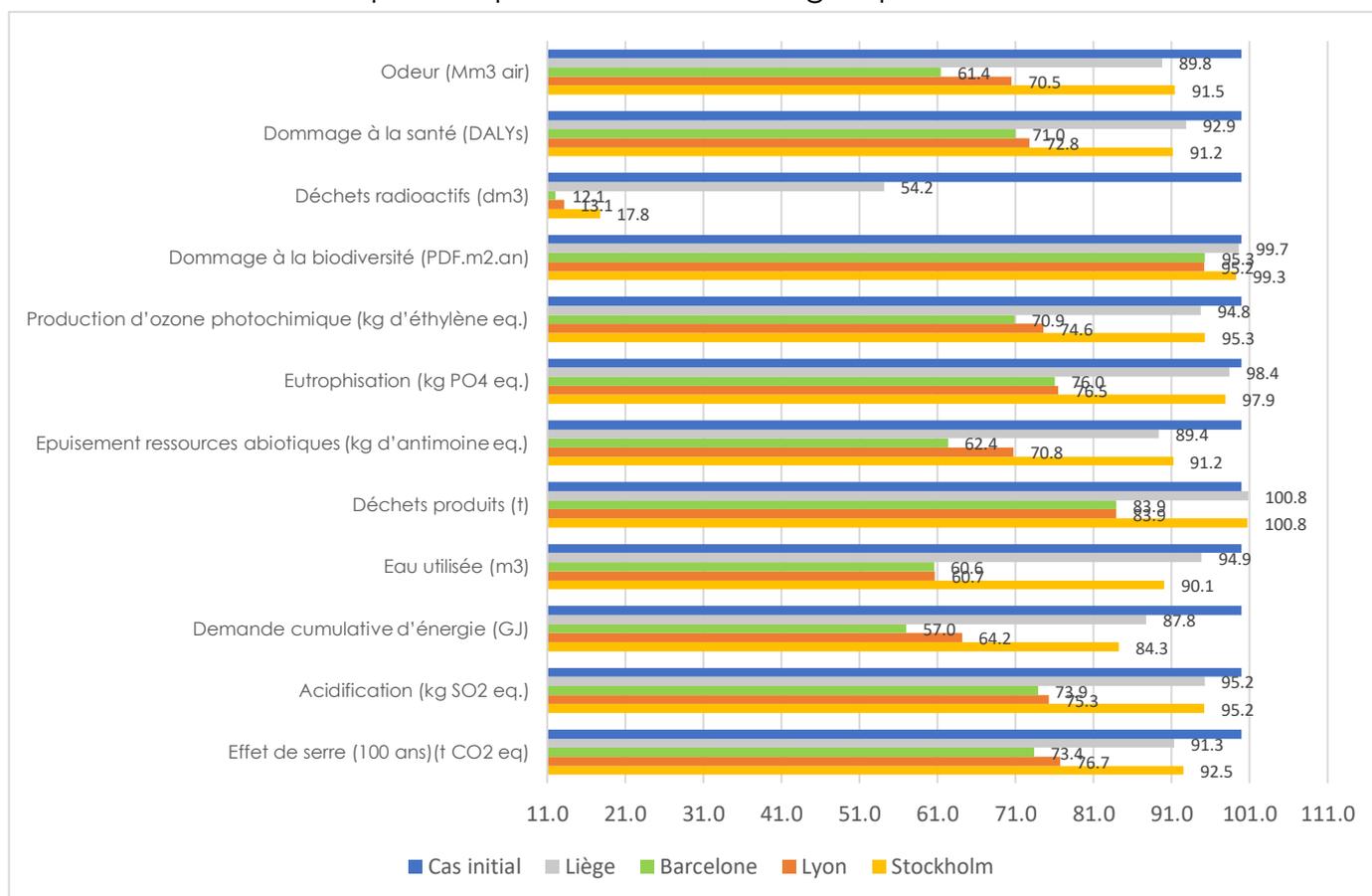


Figure 19 : Impact de l'augmentation du taux d'énergie renouvelable dans l'ACV

Nous remarquons assez rapidement que les villes de Barcelone et Lyon sont similaires, elles réduisent considérablement leurs impacts. En effet, par rapport à leurs cas initiaux, les impacts sont réduits de 15% à plus de 85%.

De même, Stockholm et Liège présentent des résultats assez similaires, elles aussi réduisent de manière générale leur impact dans ce cas-ci sauf au niveau de l'indicateur « déchets produits ». Tous les deux voient leur impact augmenter de 0,8%.

L'écart le plus marquant est au niveau de l'indicateur déchets radioactifs, en effet, celui-ci est dû à la présence du nucléaire dans le scénario initial qui disparaît dans celui-ci. Il diminue de plus de 80 % pour Stockholm, Lyon et Barcelone mais seulement de 45% pour Liège.

PARTIE 10 | IMPACT DE LA GESTION DES EAUX

Dans cette partie, nous allons étudier trois scénarios. Premièrement, nous allons augmenter la part de surface perméable disponible sur le quartier. Puis, repartant du cas initial, nous allons ajouter un système de récupération des eaux de pluie. Et enfin, nous allons combiner ces deux scénarios.

10.1 Sol perméable

Il s'agit dans cette partie d'augmenter la surface perméable dans le quartier qui dans le cas initial était définie comme non existante.

Nous décidons alors de transformer la moitié des cours intérieurs en espaces verts. Ainsi 430 m² d'espaces verts sont créés.

La figure 21 ci-dessous reprend les résultats de l'ACV.

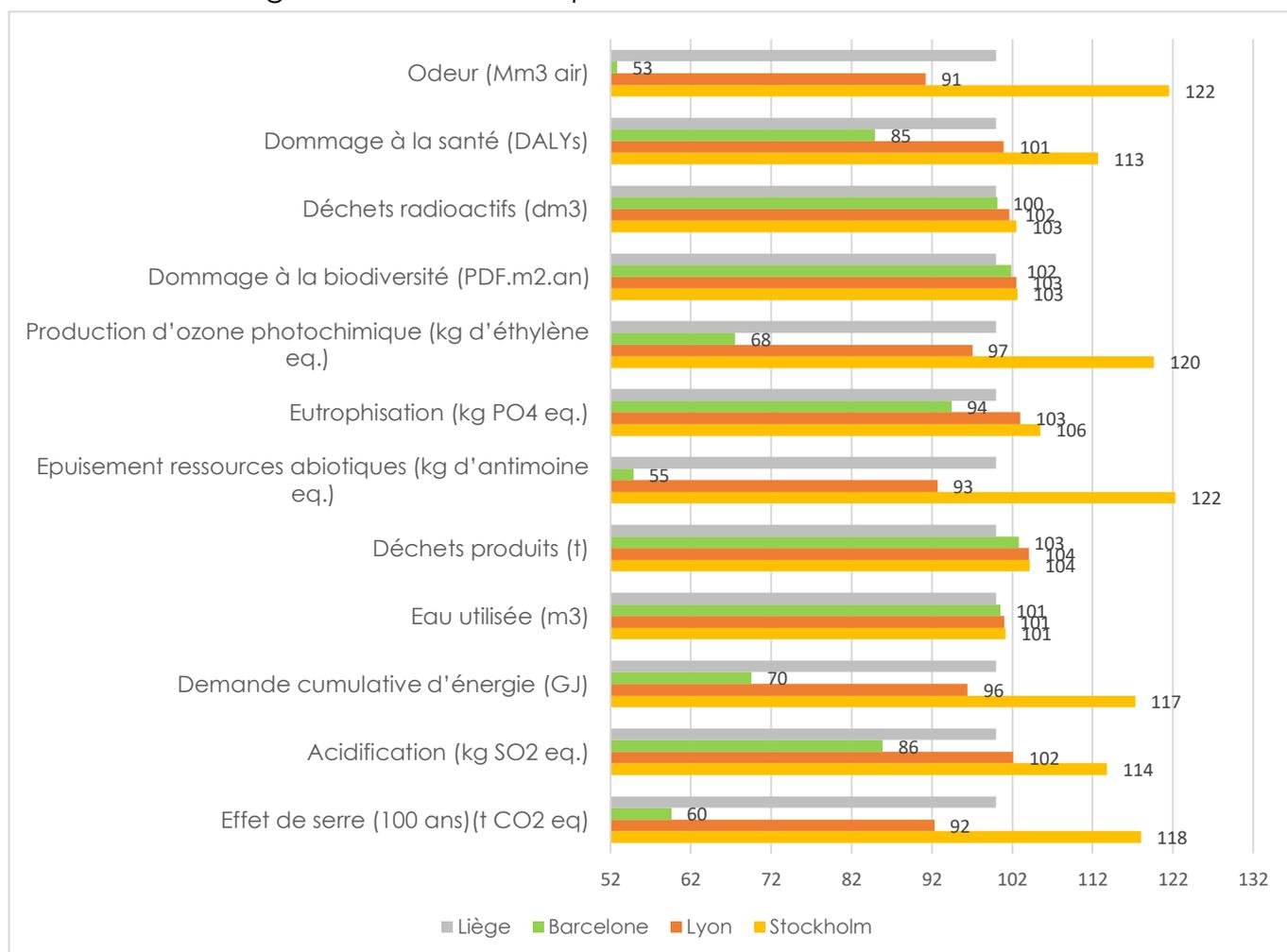


Figure 20 : Influence du climat sur l'impact de la perméabilisation des sols dans l'ACV

Nous observons les mêmes tendances que la plupart des cas précédents. Stockholm est la ville ayant le plus fort impact sur l'environnement pour tous les indicateurs alors que Barcelone en a le moins. L'influence du climat est une fois de plus démontrée.

Ensuite, nous remarquons que l'impact des indicateurs : déchets radioactifs, dommage à la biodiversité, déchets produits et eau utilisée sont assez similaires pour les quatre villes. Le climat semblerait donc ne pas influencer ces indicateurs.

Analysons maintenant l'influence propre de la perméabilisation des sols dans chaque ville.

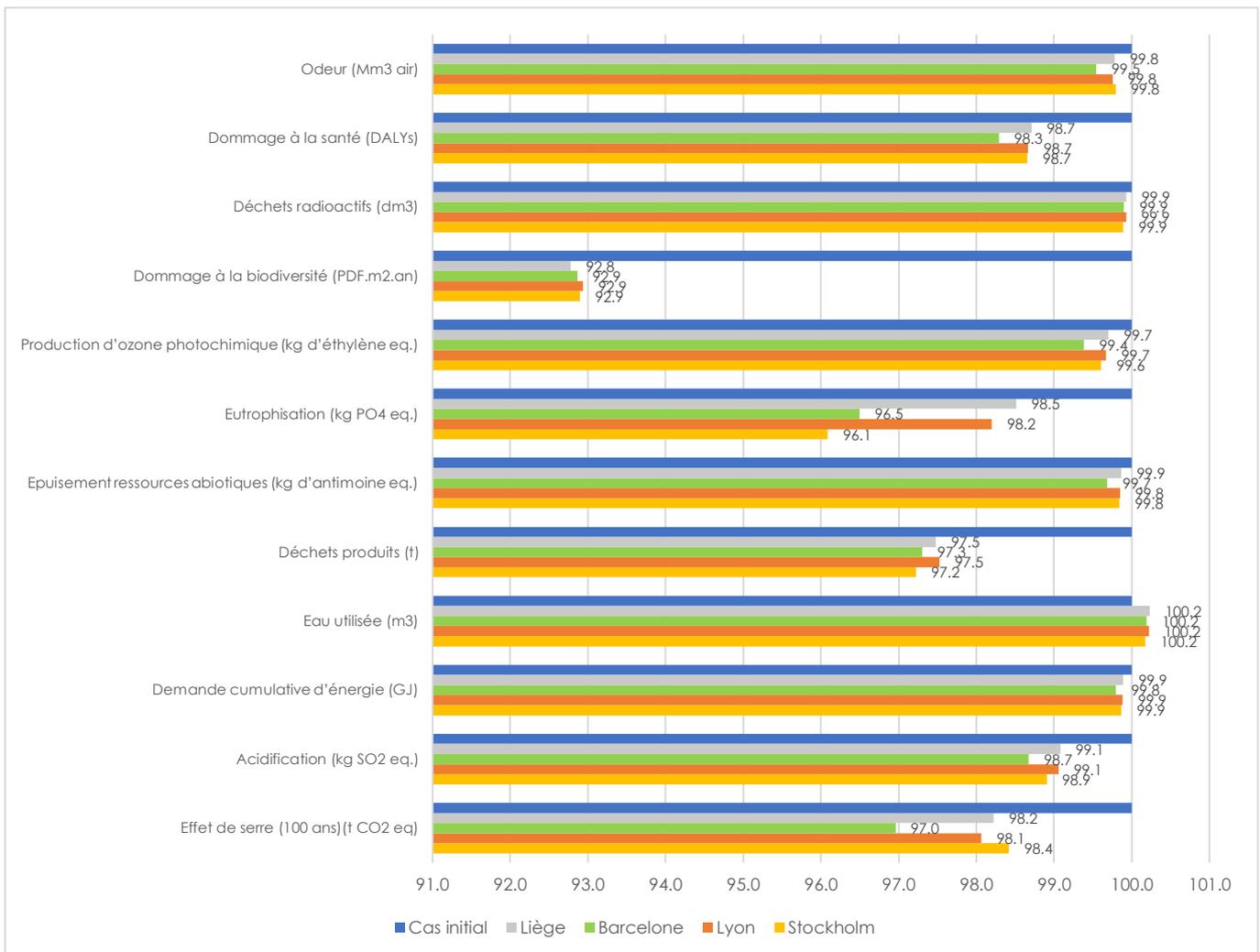


Figure 21 : Impact de la perméabilisation des sols

Les résultats nous montrent que la perméabilisation des sols n'a pas beaucoup d'impact. En effet les résultats ne varient pas de plus de 2% dans chaque ville sauf pour trois indicateurs.

En effet, l'impact « dommage à la biodiversité » est réduit de plus de 7% pour toutes les villes. L'eutrophisation diminue de plus de 3% pour

Barcelone et Stockholm. L'impact des déchets produits diminue lui aussi d'un peu plus de 2% pour les quatre villes.

Le faible impact de ce scénario peut être du à la surface perméable qui n'a été augmentée que de 430 m². Ceci ne représente que 7% du quartier considéré. Étant situé en zone urbaine, il est difficile de convertir des espaces construits en espaces verts.

10.2 Récupération eau de pluie

Dans ce scénario, nous mettons en place un système de récupération des eaux de pluie. L'eau récupérée servira pour l'arrosage, le nettoyage des espaces extérieurs et intérieurs ainsi que les chasses d'eau et le lave-linge.

Nous mettons à disposition toute la surface disponible en toiture, c'est à dire 1521 m². La perméabilité des sols reste identique au scénario initial.

Les résultats de l'ACV sont présentés dans la figure 23 ci-dessous.

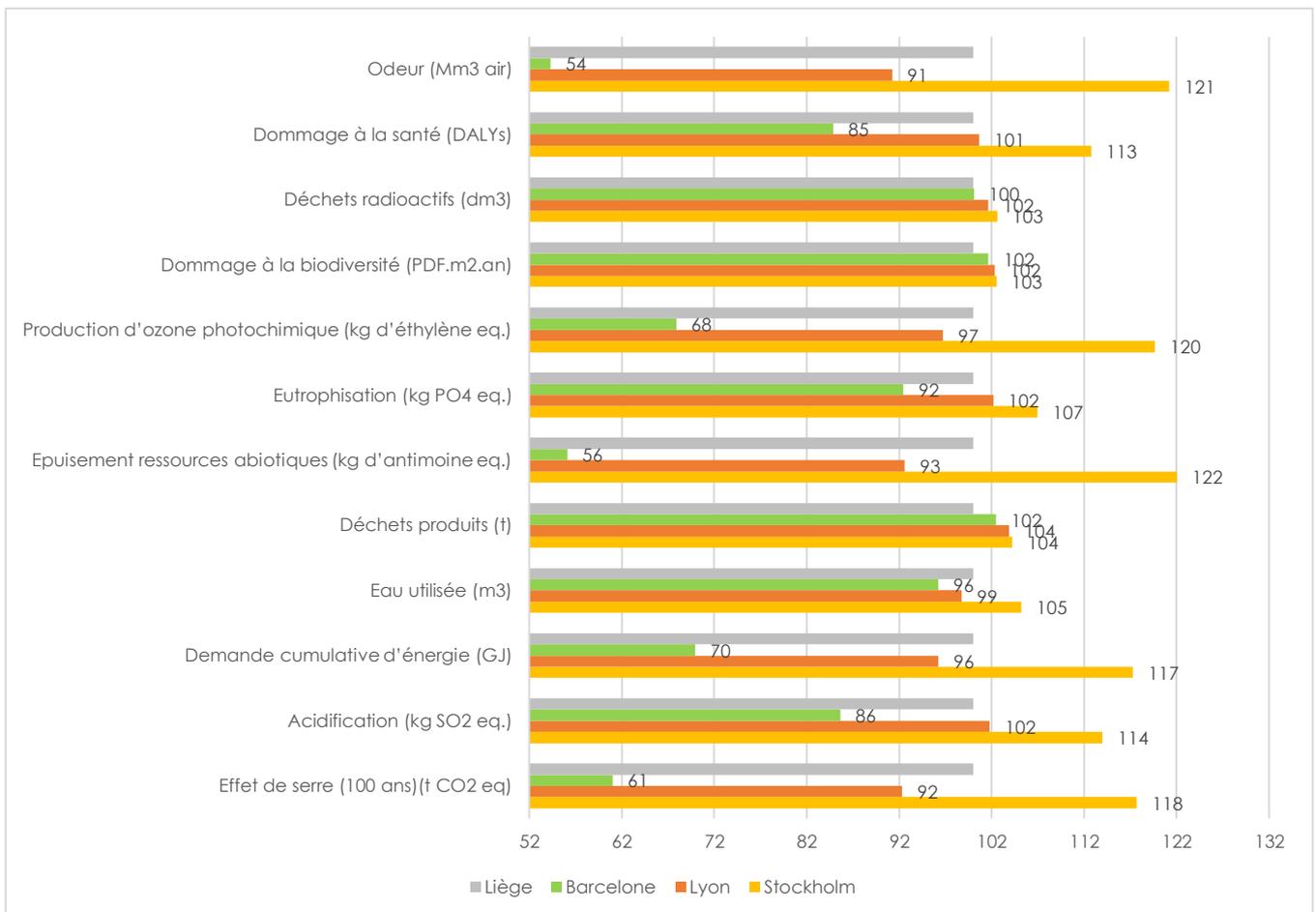


Figure 22 : Impact de la perméabilisation des sols sur l'ACV

Globalement, les résultats semblent similaires pour les indicateurs : déchets radioactifs, dommage à la biodiversité et déchets produits. Nous pouvons supposer que le climat n'a pas d'influence sur ces indicateurs.

Ensuite nous remarquons les mêmes tendances que pour les scénarios précédents avec Stockholm engendrant le plus d'impact et Barcelone, le moins. Les résultats pour Lyon sont proches de ceux pour Liège.

La figure 24 ci-dessous compare l'impact propre de la récupération des eaux de pluie.

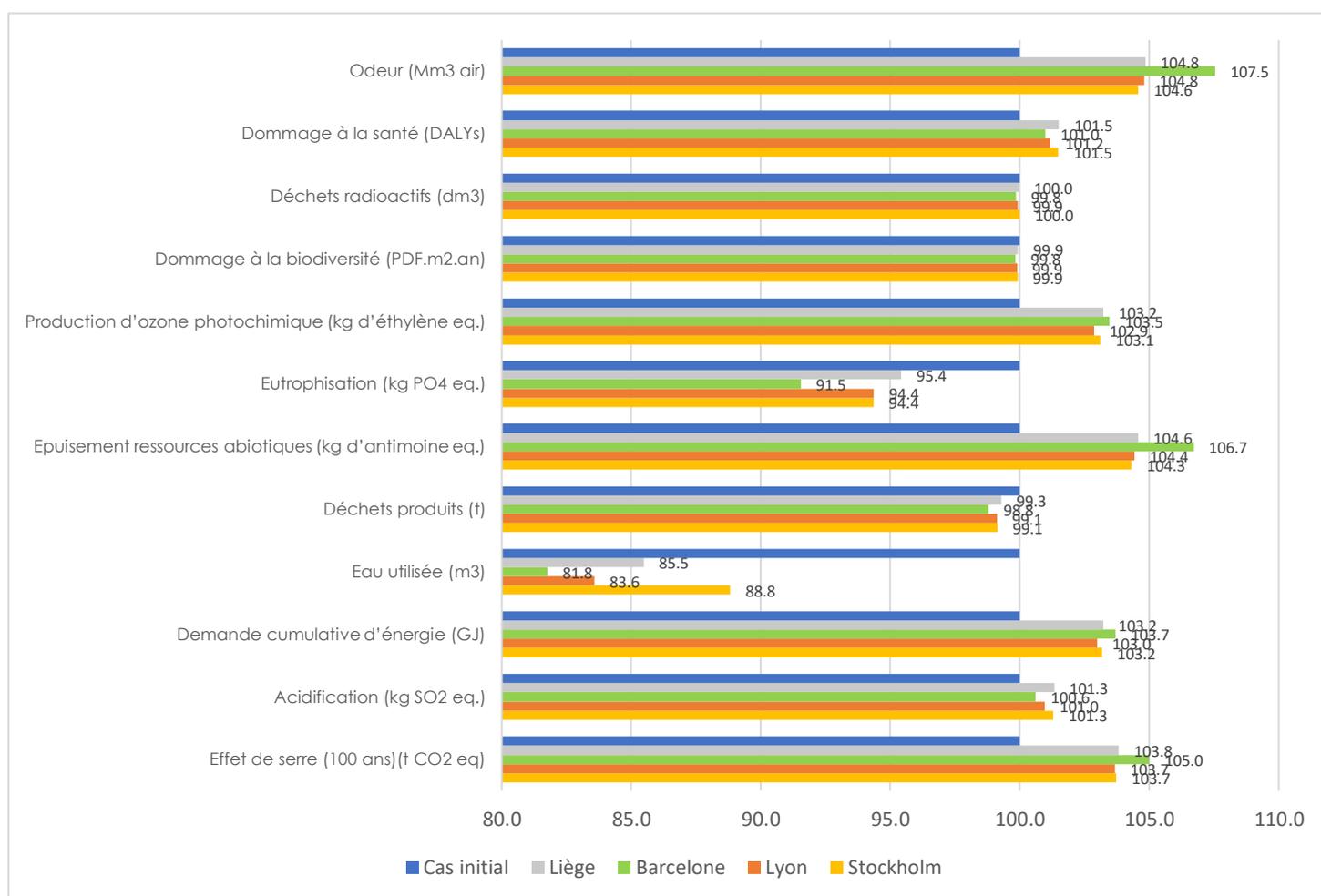


Figure 23 : Impact de la récupération des eaux dans l'ACV

Clairement, ajouter un système de récupération des eaux de pluie permet de diminuer l'eau utilisée. En effet, pour Liège cet indicateur diminue de 14,5%, pour Lyon : 16,4%, pour Stockholm, 11,2% et 18,2% pour Barcelone.

Elle permet également de diminuer l'impact de l'eutrophisation. L'eau de pluie récupérée ne s'infiltre pas dans le sol et ne se mélange pas

avec le réseau d'eaux usées. Il est question d'une diminution de 4,6% pour Liège, 5,6% pour Lyon et Stockholm et 8,5% pour Barcelone.

Les indicateurs : déchets produits, dommage à la biodiversité, déchets radioactifs, dommage à la santé n'évoluent pas plus de 2% pour toutes les villes.

Cependant, les indicateurs concernant l'odeur, la production d'ozone photochimique, l'épuisement des ressources abiotiques, la demande cumulative d'énergie et l'effet de serre augmentent légèrement pour toutes les villes.

10.3 Combinaison des deux scénarios

Dans cette partie nous combinons les deux scénarios précédents. Les résultats sont représentés sur la figure 25 ci-dessous :

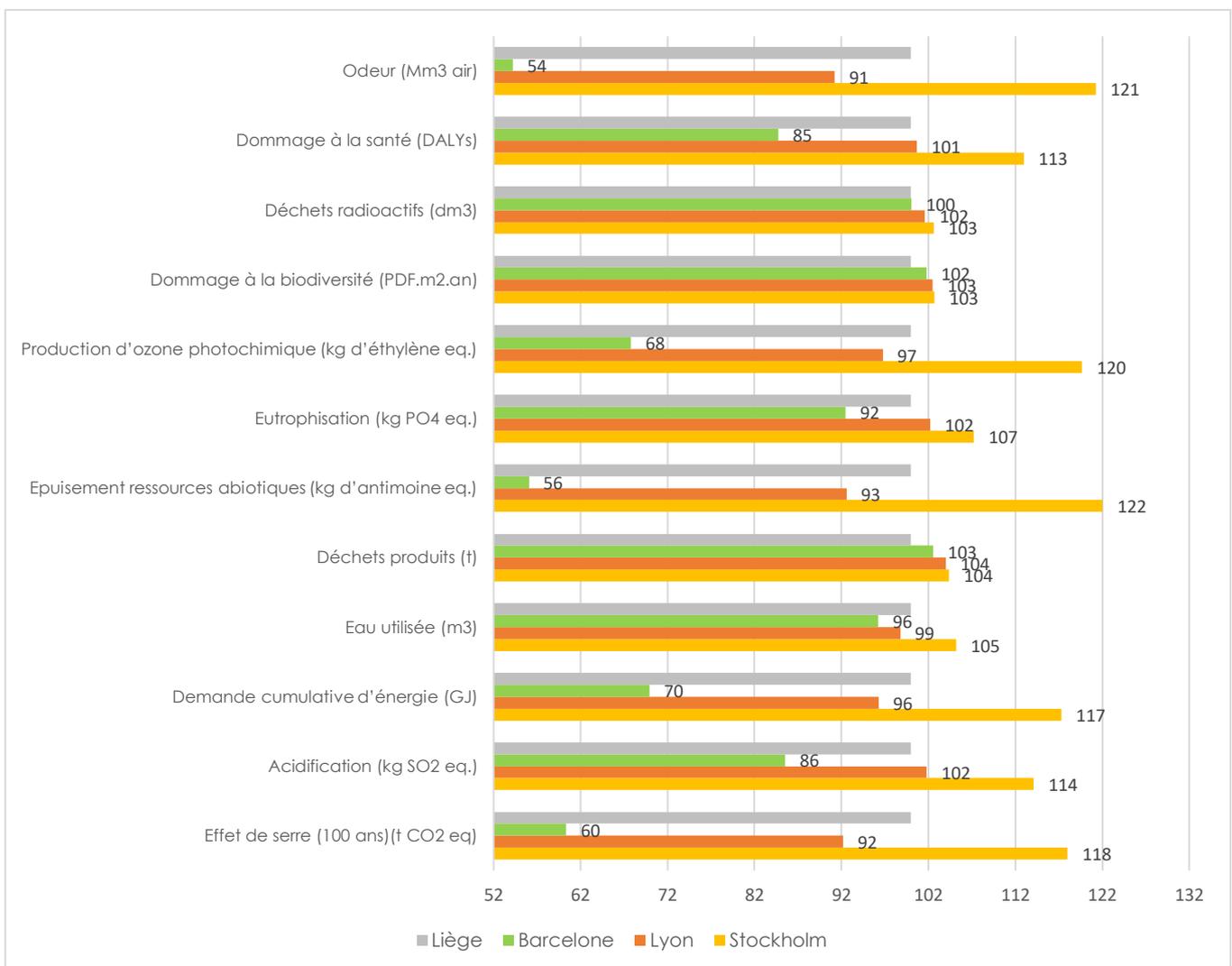


Figure 24 : Influence du climat sur l'impact de la perméabilisation des sols et récupération de l'eau de pluie dans l'ACV

Les résultats semblent être hétérogènes sauf pour les indicateurs : déchets radioactifs, dommage à la biodiversité et déchets produits. Le climat semble donc une fois de plus ne pas avoir d'influence sur ces indicateurs.

L'indicateur odeur présente une grande étendue, en effet, cet indicateur a 21% d'impact de plus à Stockholm par rapport à Liège et 46% de moins à Barcelone qu'à Liège. Pour Lyon, cet indicateur est 9% plus faible par rapport à Liège. Il semblerait donc que pour ce scénario l'odeur a un impact moins important dans les climats chauds que froids.

Ensuite, l'épuisement des ressources abiotiques a 44% d'impact en moins lorsqu'on se situe à Barcelone qu'à Liège. Les besoins énergétiques étant plus faibles à Barcelone, nous consommons moins d'énergie et nous puisons moins dans le stock des ressources naturelles. De même pour la production d'ozone photochimique et l'effet de serre, l'impact est moins important dans les climats plus chauds.

Analysons maintenant l'impact propre de ce scénario :

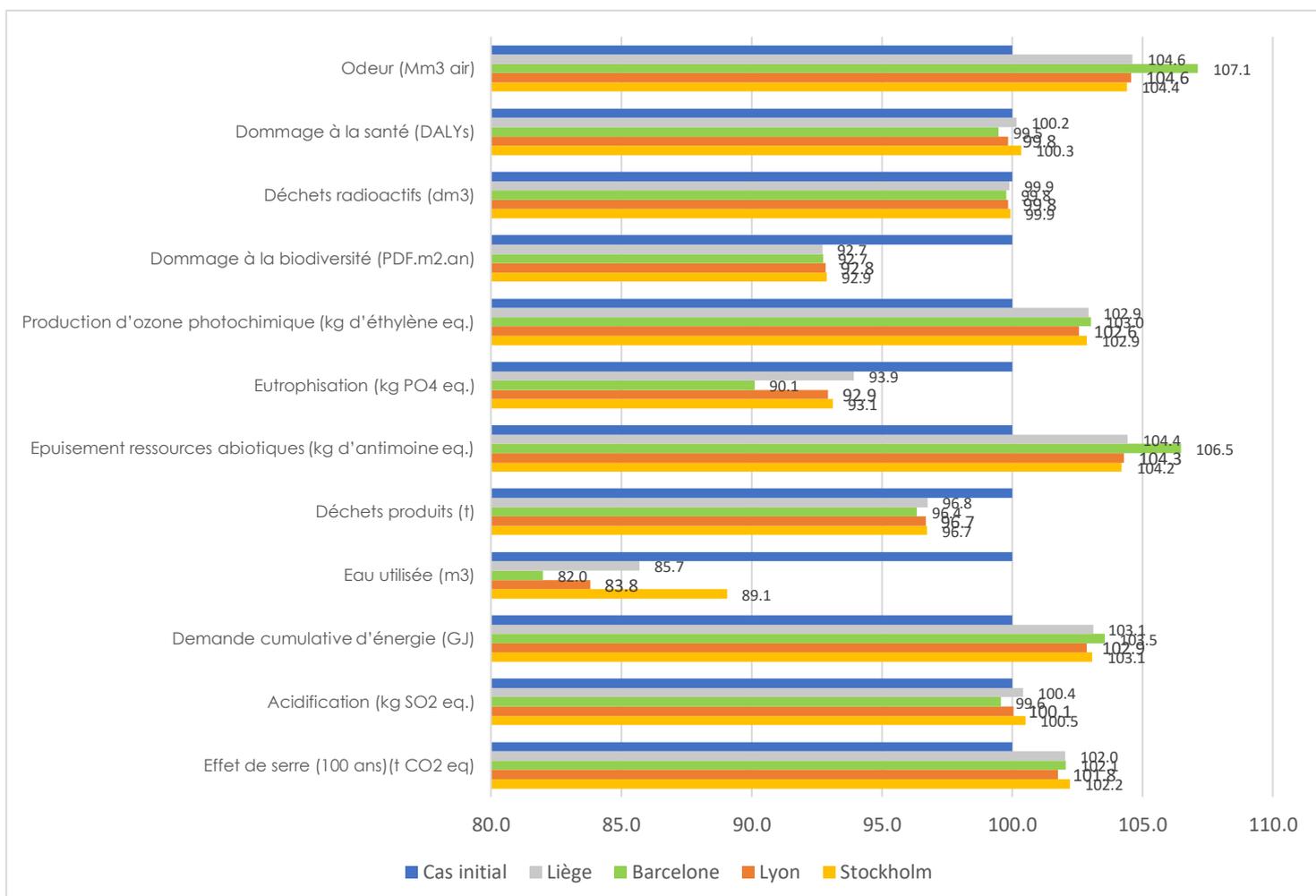


Figure 25 : Impact de la perméabilisation des sols et récupération de l'eau de pluie dans l'ACV

Nous remarquons que la perméabilisation des sols et la récupération de l'eau de pluie a un impact sur les paramètres suivants : eau utilisée, déchets produits, eutrophisation et dommage à la biodiversité. En effet, par rapport à leurs cas initial, l'impact de l'eau utilisé est réduit de 10,9% pour Stockholm, 14,3% pour Liège, 15,2% pour Lyon et 18% pour Barcelone. L'eutrophisation est réduite de 6,1% pour Liège, 6,9% pour Stockholm, 7,1% pour Lyon et 9,9% pour Barcelone. Les dommages à la biodiversité sont réduits de plus de 7% et enfin, les déchets produits sont réduits de plus de 3% pour toutes les villes.

En revanche, les impacts liés à l'odeur et l'épuisement des ressources abiotiques augmentent de plus de 4% pour Liège, Lyon et Barcelone. A Barcelone, l'impact lié à l'épuisement des ressources abiotiques est de plus de 6% et celui lié à l'odeur augmente de plus de 7%.

PARTIE 12 | IMPACT DE L'INSTALLATION DE PANNEAUX SOLAIRES

Nous allons maintenant étudier l'impact de l'installation des panneaux solaires photovoltaïques. Pour cela, nous utilisons les 2/3 de surface de toiture disponible, ce qui correspond à 1 012 m² de panneaux solaires photovoltaïques. L'électricité provenant de ces panneaux sera utilisée pour l'éclairage et l'alimentation des appareils électriques qui utilisaient auparavant le réseau électrique du pays concerné.

Pour leur rendement plus performant, nous choisissons l'installation des panneaux solaires photovoltaïques monocristallins. Afin de ne pas générer une nuisance visuelle, ces panneaux sont installés en surimposition face aux toitures. Ainsi une lame d'air est présente entre les panneaux et la toiture. Dans cette configuration, l'orientation n'est donc pas optimale pour chaque bâtiment.

12.1 Analyse de la STD

Couverture %		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	TOTAL
Liège	C1	35%	50%	84%	129%	138%	138%	143%	117%	101%	73%	45%	22%	90%
	C2	38%	54%	92%	142%	151%	151%	157%	128%	110%	79%	49%	24%	98%
	C3	48%	68%	116%	178%	190%	190%	197%	161%	138%	100%	61%	31%	124%
	C4	35%	50%	85%	130%	139%	139%	144%	118%	101%	73%	45%	22%	91%
Lyon	C1	35%	52%	95%	134%	152%	170%	176%	144%	107%	65%	39%	27%	100%
	C2	45%	62%	108%	147%	163%	176%	181%	155%	121%	76%	51%	33%	110%
	C3	53%	73%	127%	174%	197%	215%	223%	179%	137%	89%	58%	40%	131%
	C4	49%	63%	109%	145%	156%	173%	182%	153%	121%	80%	54%	36%	111%
Barcelone	C1	65%	86%	123%	163%	190%	193%	200%	166%	127%	96%	70%	54%	128%
	C2	85%	103%	141%	176%	198%	198%	207%	179%	143%	114%	90%	74%	143%
	C3	96%	115%	164%	216%	251%	248%	263%	203%	174%	124%	100%	84%	170%
	C4	96%	111%	144%	177%	197%	195%	204%	175%	144%	118%	100%	83%	146%
Stockholm	C1	8%	25%	63%	113%	155%	160%	152%	118%	72%	32%	9%	4%	76%
	C2	12%	35%	79%	131%	163%	166%	157%	133%	85%	41%	14%	7%	86%
	C3	13%	39%	90%	149%	202%	205%	190%	145%	98%	48%	15%	7%	101%
	C4	15%	38%	82%	131%	168%	167%	162%	129%	86%	44%	15%	9%	87%

Tableau 14 : Couverture des panneaux solaires dans la production d'électricité

Les résultats de la STD nous montrent que de manière générale, la production d'électricité excède la consommation pour toutes les villes pendant les mois d'avril, mai, juin, juillet et août. Pour Barcelone Lyon et Liège ce phénomène se prolonge jusqu'en septembre. Pour Barcelone, le reste du temps plus de 50% de sa consommation est couverte par les panneaux solaires. Ces chiffres auraient pu être encore meilleurs si l'orientation et l'inclinaison étaient optimales.

12.2 Analyse de l'ACV

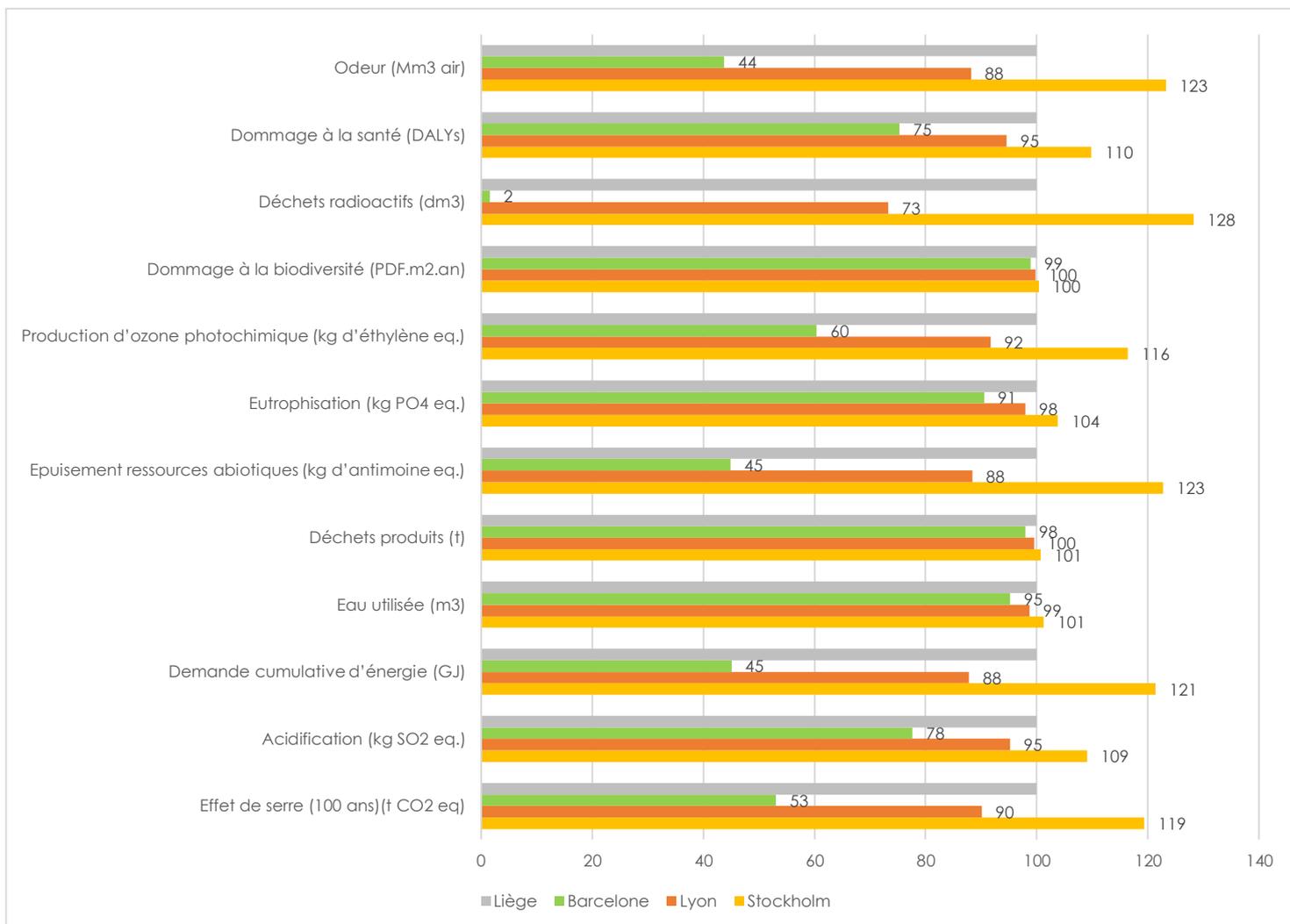


Figure 26 : Influence du climat sur l'impact de l'installation des panneaux solaires photovoltaïques dans l'ACV

Globalement, nous pouvons faire les mêmes remarques que précédemment. L'impact des dommages à la biodiversité et les déchets produits sont similaires pour les quatre villes. Le climat semblerait donc une fois de plus ne pas avoir d'impact sur ces indicateurs. En revanche, cette fois-ci, nous constatons des résultats fortement hétérogènes pour l'indicateur déchets radioactifs. En effet, l'écart le plus proche avec le cas de Liège correspond à 27%, il s'agit de Lyon. Alors que les impacts pour Barcelone sont réduits de 98%, ce qui est énorme, ils ont augmenté de 28% pour Stockholm. Nous pouvons expliquer ceci par le fait que les besoins énergétiques pour la Suède sont les plus élevés, et comme vus dans l'analyse de la STD, la couverture des panneaux solaires installés à Stockholm est la moins élevée. Stockholm puise donc son énergie sur le réseau, qui rappelons-le est constitué de 61% de nucléaire.

En outre, la tendance selon laquelle les impacts sont moins importants dans les climats plus chauds semble une fois de plus vérifiée.

Comparons maintenant l'impact de l'installation des panneaux solaires photovoltaïques dans chaque ville.

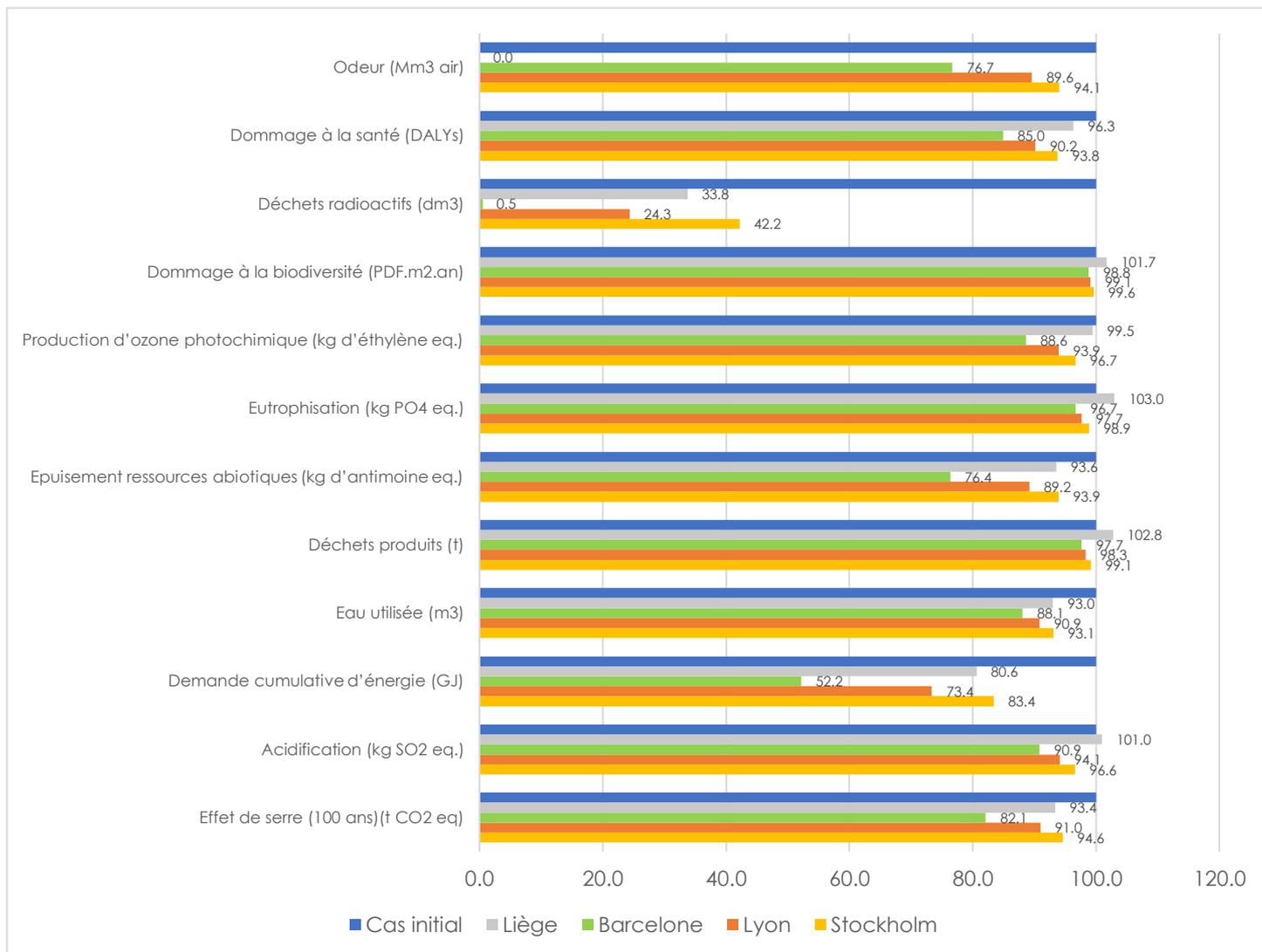


Figure 27 : Impact de l'installation des panneaux solaires photovoltaïques dans l'ACV

Parmi les scénarios étudiés, l'installation de panneaux solaires photovoltaïques est celui qui diminue le plus les impacts environnementaux. Surtout en ce qui concerne la production de déchets radioactifs, chaque ville diminue considérablement son impact. Stockholm avec le plus faible taux réduit déjà de plus de 58% son impact, Liège de 76%, Lyon 75% et Barcelone 99% ! En effet ces résultats concordent avec la couverture des panneaux solaires présentée dans la partie précédente. Barcelone couvrirait presque toute son énergie grâce à l'installation, puis Lyon, Liège et Stockholm.

Ce scénario diminue également la demande cumulative d'énergie pour chaque ville. Barcelone profitant de l'ensoleillement le plus favorable diminue son impact de plus de 47%. D'autant plus que les panneaux solaires ont été installés en surimposition des toitures, leur orientation et inclinaison

n'étaient pas forcément optimales. Cet impact aurait donc davantage pu être réduit !

L'impact de l'épuisement des ressources abiotiques, la production d'ozone photochimique et l'acidification est également réduit pour toutes les villes. Le réseau national étant moins sollicité, les émissions de gaz nocifs pour l'environnement ont également diminué.

PARTIE 14 | IMPACT DE LA MOBILITE

Étant en zone urbaine, le recours à la voiture reste occasionnel. Nous avons tout de même voulu étudier ce cas.

Rappelons que dans notre scénario initial, 80% des occupants effectuent quotidiennement le trajet domicile-travail d'une distance de 500 m en transport en commun (bus), un trajet domicile-commerce est effectué une fois par semaine sur une distance de 2 500 m. Ces valeurs étaient données par défaut par le logiciel.

Nous allons étudier le cas où 100% des habitants effectuent un trajet journalier domicile-travail sur une distance de 1 km, un trajet hebdomadaire domicile-commerce de 500 m.

14.1 Analyse de l'ACV

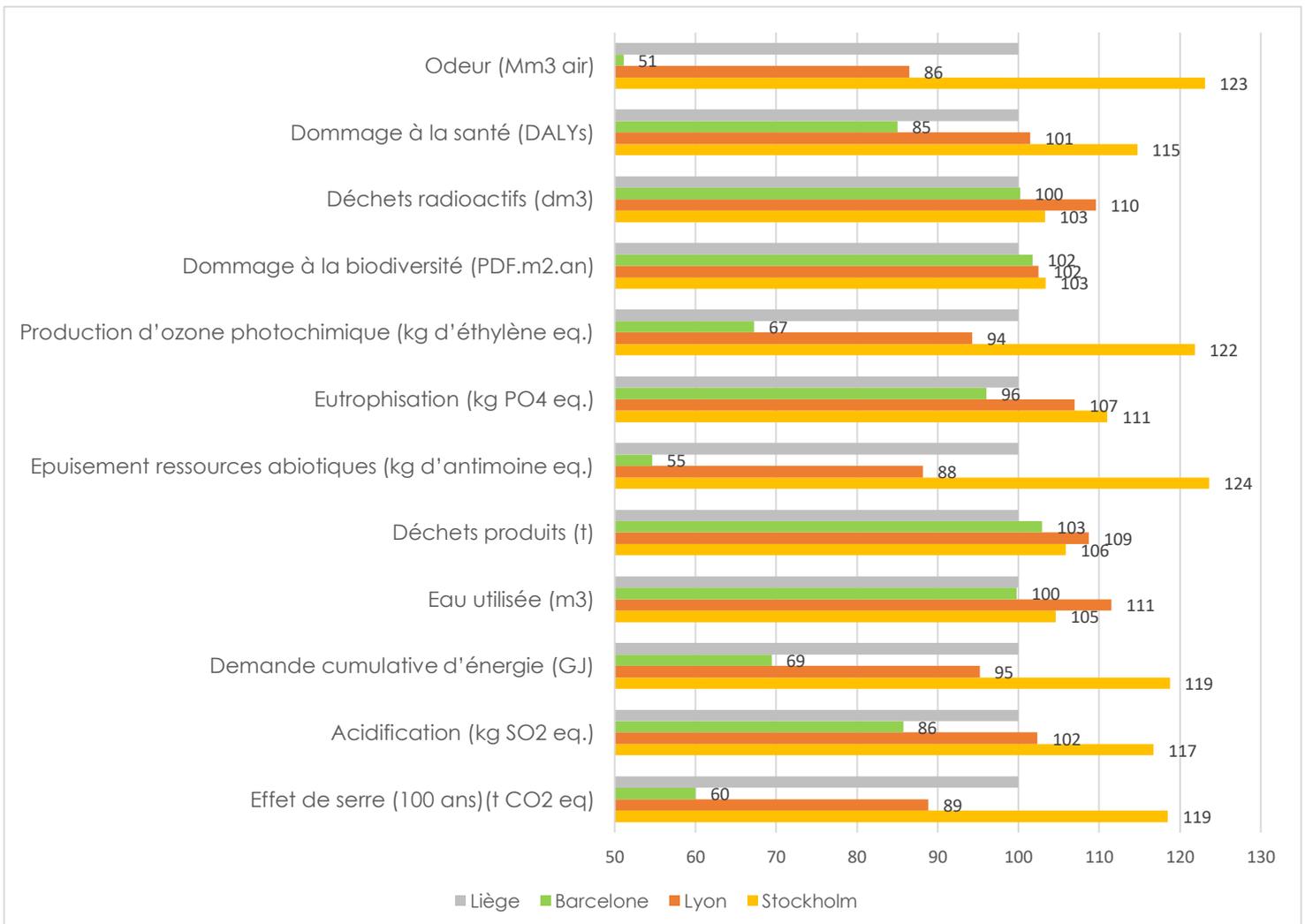


Figure 28 : Influence du climat sur l'impact de la mobilité dans l'ACV

Cette fois-ci, seulement l'impact dommage à la biodiversité semble similaire pour les 4 villes même si l'écart-type des résultats n'est pas très grand pour les deux autres paramètres qui présentaient des résultats similaires d'habitude.

Cependant, la tendance des zones climatiques plus chaudes ayant un impact moins important est toujours respectée avec toujours le même ordre de grandeur pour les écarts-types.

Analysons maintenant, l'impact de ce scénario pour chaque ville.

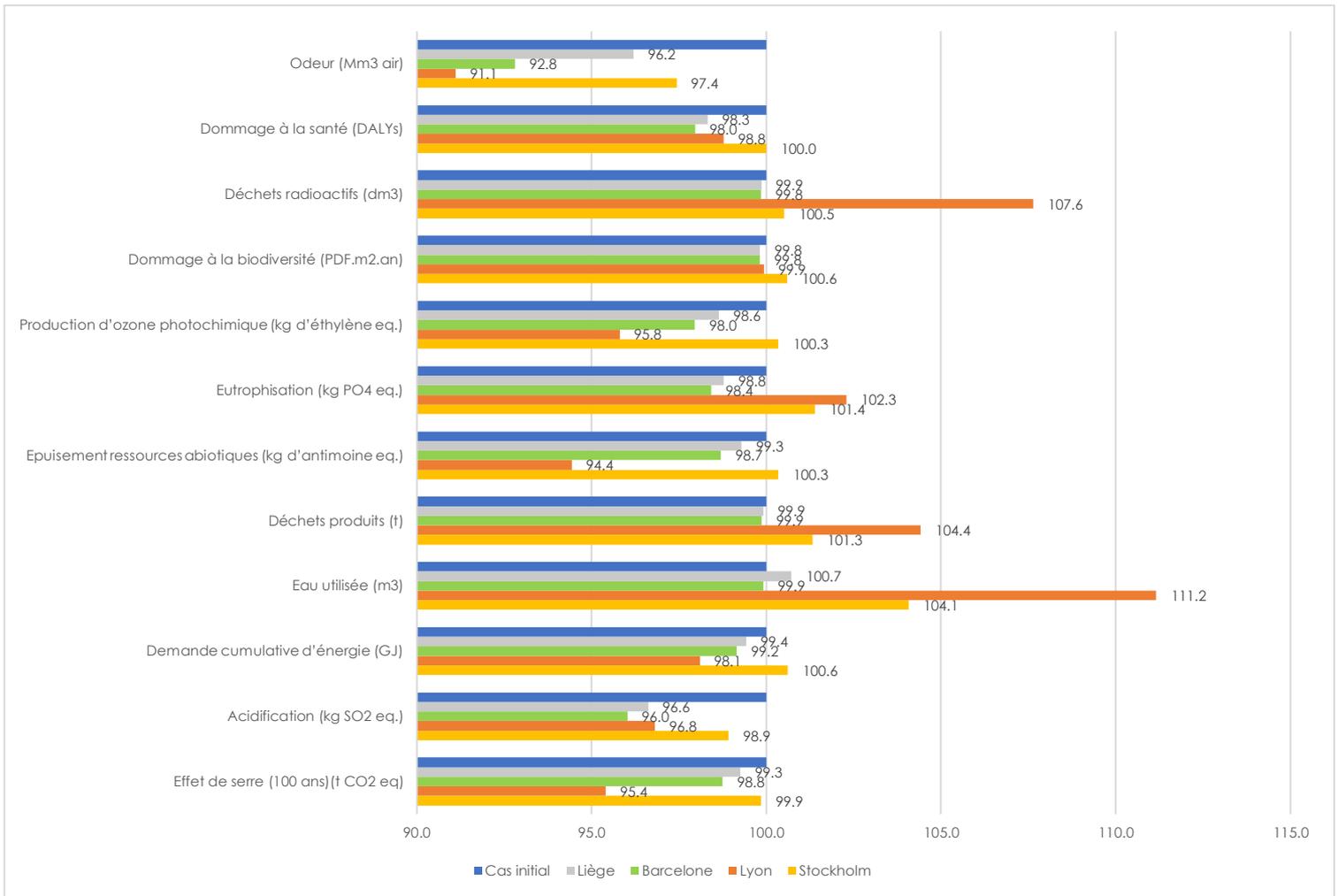


Figure 29 : Impact de la mobilité dans l'ACV

Lyon semble être la ville la plus impactée par ce scénario, en effet pour quasiment tous les indicateurs, c'est elle qui présente les extrêmes. Cependant, les résultats qui se détachent concernent les impacts déchets radioactifs et eau utilisée. En effet, la diminution des trajets a étonnement augmenté l'impact de ces indicateurs. Pour l'eau, elle concerne la phase d'utilisation de l'eau, il est question d'une augmentation de l'ordre de 12% par rapport à la situation initiale de Lyon. Pour les déchets radioactifs, l'augmentation a lieu durant la phase d'utilisation également.

Les impacts de la production d'ozone photochimique, l'épuisement des ressources abiotiques, l'acidification et l'effet de serre sont également réduits dans ce scénario. En effet, en diminuant les distances, et favorisant l'utilisation d'un bus, les émissions provenant de la combustion des carburant est minimisé, ou plutôt rationalisé.

Globalement, étant déjà situé en zone urbaine, nous remarquons que même si ce scénario n'était pas très différent de l'initial, il a eu le mérite d'influer sur tous les indicateurs. Ainsi, dans un quartier à plus grande échelle, avec plus d'occupants, ces résultats témoignent que le facteur de la mobilité est un poste à prendre en compte sérieusement pour toute politique de développement à l'échelle urbaine.

PARTIE 16 | COMPARAISON DES SCENARIOS

Cette partie qui fera également office de discussions regroupera tous les résultats des différents scénarios étudiés.

Dans le tableau ci-dessous un aperçu de ces derniers.

		Effet de serre (100 ans)(t CO ₂ eq)	Acidification (kg SO ₂ eq.)	Demande cumulative d'énergie (GJ)	Eau utilisée (m ³)	Déchets produits (t)	Epuisement ressources abiotiques (kg d'antimoine eq.)	Eutrophisation (kg PO ₄ eq.)	Production d'ozone photochimique (kg d'équivalent eq.)	Domage à la biodiversité (PDF.m ² .an)	Déchets radioactifs (dm ³)	Domage à la santé (DALYs)	Odeur (Mm ³ air)
Situation initiale	Liège	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Impact du climat	Stockholm	118	114	117	101	104	122	108	120	103	103	113	22
	Lyon	92	102	96	101	104	93	103	97	102	102	101	91
	Barcelone	60	86	70	101	103	55	96	68	102	100	85	53
Remplacement des châssis	Stockholm	137	134	141	124	114	148	127	143	107	125	131	147
	Lyon	89	95	91	99	100	87	98	91	100	100	95	87
	Barcelone	63	89	73	100	102	59	97	72	102	100	88	56
Isolation des parois	Stockholm	110	104	108	100	98	113	101	108	99	100	104	114
	Lyon	92	91	91	99	94	89	94	90	97	98	92	91
	Barcelone	76	91	82	100	97	71	96	82	99	99	91	69
Remplacement des châssis et isolation des parois	Stockholm	108	103	106	100	100	111	101	106	100	100	103	112
	Lyon	96	99	97	100	100	95	100	97	100	100	99	95
	Barcelone	86	95	90	100	100	82	98	90	100	100	95	81
Mix énergétique	Stockholm	109	109	99	91	105	112	106	114	102	18	103	111
	Lyon	87	102	97	102	105	86	104	95	103	122	101	84
	Barcelone	66	133	63	95	113	59	118	93	104	48	98	46
Augmentation du taux d'énergie renouvelables	Liège	91	95	88	95	101	89	98	95	100	54	93	90
	Stockholm	109	109	99	91	105	112	106	114	102	18	103	111
	Lyon	71	77	62	61	87	66	79	72	97	13	74	64
Sols perméables	Barcelone	44	64	40	61	86	34	73	48	97	12	61	33
	Stockholm	118	114	117	101	104	122	106	120	103	103	113	122
	Lyon	92	102	96	101	104	93	103	97	103	102	101	91
Récupération eau de pluie	Barcelone	60	86	70	101	103	55	94	68	102	100	85	53
	Stockholm	118	114	117	105	104	122	107	120	103	103	113	121
	Lyon	92	102	96	99	104	93	102	97	102	102	101	91
Sol perméable et récupération eau de pluie	Barcelone	61	86	70	96	102	56	92	68	102	100	85	54
	Stockholm	118	114	117	105	104	122	107	120	103	103	113	121
	Lyon	92	102	96	99	104	93	102	97	103	102	101	91
Panneaux solaires	Barcelone	60	86	70	96	103	56	92	68	102	100	85	54
	Stockholm	119	109	121	101	101	123	104	116	100	128	110	123
	Lyon	90	95	88	99	100	88	98	92	100	73	95	88
Mobilité	Barcelone	53	78	45	95	98	45	91	60	99	2	75	44
	Stockholm	119	117	119	105	106	124	111	122	103	103	115	123
	Lyon	89	102	95	111	109	88	107	94	102	110	101	86
Barcelone	60	86	69	100	103	55	96	67	102	100	85	51	

Tableau 15 : Variation des impacts environnementaux de tous les scénarios étudiés par rapport au cas initial de Liège

Les résultats sont indiqués sous forme de pourcentage. Ils représentent l'impact des indicateurs par rapport au cas initial : le quartier situé à Liège. En effet, dans chaque scénario, chaque ville est donc comparée au cas de Liège. Attention cependant, ici, situation initiale ne veut pas dire pour chaque scénario le cas du quartier à Liège avec seulement les données météorologiques et le mix énergétique correspondant. Dans ce tableau, situation initiale, correspond au cas de Liège dans chaque scénario. Le scénario est donc aussi appliqué au quartier situé à Liège.

Scénario	Stockholm	Lyon	Barcelone
	TOTAL	TOTAL	TOTAL
Impact du climat	145	46	382
Remplacement des châssis	378	68	339
Isolation des parois	65	82	243
Remplacement des châssis et isolation des parois	50	22	137
Mix énergétique	163	90	496
Augmentation du taux d'énergie renouvelables	163	377	942
Sols perméables	143	47	386
Récupération eau de pluie	147	45	389
Sol perméable et récupération eau de pluie	147	46	392
Panneaux solaires	155	94	706
Mobilité	167	90	387

Tableau 16 : Sommes des pourcentages des variations en valeurs absolues entre Liège et les autres villes

Nous remarquons que de manière générale, Barcelone est la ville pour laquelle les résultats diffèrent le plus du cas de Liège. En effet, pour tous les scénarios, mise à part le remplacement des châssis, Barcelone présente le plus d'écarts.

Nous présentons dans ce deuxième tableau, les écarts relatifs en pourcentage par rapport à Liège :

	Stockholm	Lyon	Barcelone
Scénario	TOTAL	TOTAL	TOTAL
Impact du climat	-145	16	221
Remplacement des châssis	-378	68	199
Isolation des parois	-59	82	147
Remplacement des châssis et isolation des parois	-50	22	83
Mix énergétique	21	12	164
Augmentation du taux d'énergie renouvelables	21	377	547
Sols perméables	-143	15	223
Récupération eau de pluie	-147	19	228
Sol perméable et récupération eau de pluie	-147	18	228
Panneaux solaires	-155	94	415
Mobilité	-167	6	226

Tableau 17 : Variations relatives de chaque ville par rapport à Liège selon les différents scénarios

Les chiffres positifs signifient que l'impact était moins important qu'à Liège, et ceux négatifs signifient donc qu'à travers les scénarios étudiés, les impacts étaient plus importants qu'à Liège.

Dès lors nous remarquons que les impacts environnementaux étaient beaucoup plus importants à Stockholm qu'à Liège. Les chiffres pour Lyon nous montrent qu'à part les scénarios remplacement des châssis, isolation des parois, augmentation des énergies renouvelables et panneaux solaires, les impacts sont assez similaires à Lyon et à Liège ; moins importants néanmoins à Lyon qu'à Liège. Et finalement, à Barcelone, nous remarquons que les impacts étaient beaucoup moins importants qu'à Liège.

La représentation graphique de ce tableau nous montre une tendance que nous avons remarqué lors des analyses. En effet, au cours des différents scénarios les villes situées dans les climats les plus chauds ont généré moins d'impact par rapport à Liège. Barcelone étant dans une zone plus chaude que Liège possède la courbe la plus haute. Puis Lyon, ayant un climat plus chaud que Liège se situe toujours au-dessus de l'axe des abscisses. Et enfin, Stockholm en dehors de quelques scénarios a généré toujours plus d'impacts que Liège.

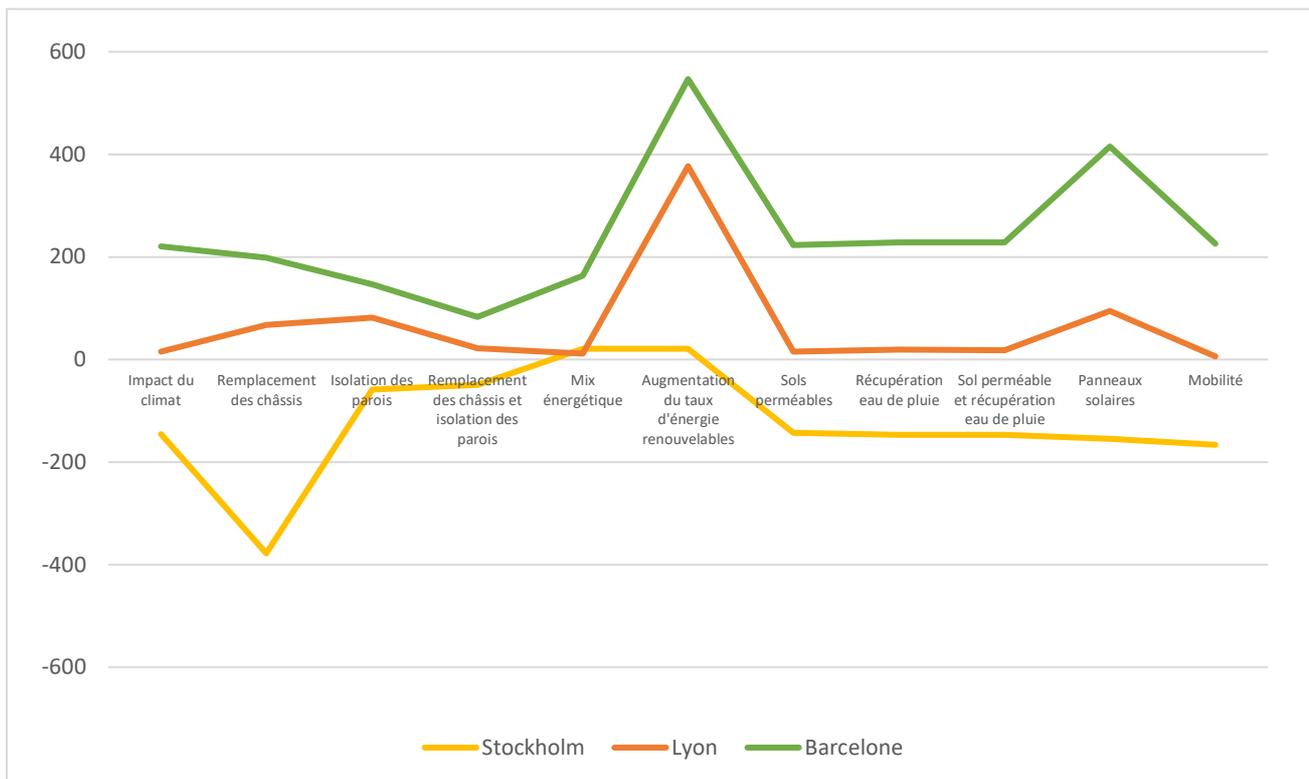


Figure 30: : Variations relatives de chaque ville par rapport à Liège selon les différents scénarios

Ce graphique nous permet également de remarquer que sous l'influence du climat, les scénarios concernant l'augmentation des énergies renouvelables et l'installation des panneaux solaires ont été très positifs pour réduire les impacts environnementaux pour les trois villes. En revanche, le remplacement des châssis a été très nocif pour l'environnement à Stockholm.

Nous allons maintenant mettre en avant les scénarios de rénovation qui devront être considérés en priorité en fonction de leur importance dans la réduction des impacts environnementaux. Pour cela, tous les résultats pour chaque ville sont regroupés dans le tableau ci-dessous ; les chiffres sont en pourcentages et ils correspondent aux variations par rapport à la situation initiale. Cette fois-ci, la situation initiale correspond à la situation initiale de chaque ville avant la simulation du scénario en question.

C'est pourquoi ici, contrairement à précédemment, nous voyons également les résultats pour Liège.

		Effet de serre (100 ans)/(t CO ₂ eq.)	Acidification (kg SO ₂ eq.)	Demande cumulative d'énergie (GJ)	Eau utilisée (m ³)	Déchets produits (t)	Epuisement ressources abiotiques (kg d'antimoine eq.)	Eutrophisation (kg PO ₄ eq.)	Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	Domage à la biodiversité (PDF.m ² .an)	Déchets radioactifs (dm ³)	Domage à la santé (DALYs)	Odeur (Mm ³ air)
Situation initiale	Liège	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Impact du climat	Stockholm	118	114	117	101	104	122	108	120	103	103	113	122
	Lyon	92	102	96	101	104	93	103	97	102	102	101	91
	Barcelone	60	86	70	101	103	55	96	68	102	100	85	53
Remplacement des châssis	Liège	90	101	95	101	104	91	102	95	102	101	99	89
	Stockholm	105	118	114	124	113	110	120	113	106	123	116	108
	Lyon	87	94	90	100	99	85	97	88	100	99	94	85
Isolation des parois	Barcelone	95	103	100	101	103	96	103	100	102	101	102	94
	Liège	68	91	76	101	105	64	99	81	103	100	89	61
	Stockholm	63	83	70	100	99	59	92	73	100	98	82	57
Remplacement des châssis et isolation des parois	Lyon	68	81	72	99	95	61	90	75	97	96	81	60
	Barcelone	85	96	90	100	100	82	99	99	100	99	95	79
	Liège	57	85	67	101	103	52	95	71	102	99	83	49
Mix énergétique	Stockholm	52	77	61	99	98	47	89	63	99	97	76	45
	Lyon	59	82	68	100	99	53	92	71	99	97	82	51
	Barcelone	81	94	87	100	99	77	97	94	100	99	93	74
Augmentation du taux d'énergie renouvelables	Liège	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Stockholm	93	95	84	90	101	91	98	95	99	18	91	91
	Lyon	94	100	100	101	101	93	101	98	100	120	100	92
Sols perméables	Barcelone	109	154	90	95	110	107	122	138	102	47	114	87
	Liège	91	95	88	95	101	89	98	95	100	54	93	90
	Stockholm	93	95	84	90	101	91	98	95	99	18	91	91
Récupération eau de pluie	Lyon	77	75	64	61	84	71	76	75	95	13	73	70
	Barcelone	73	74	57	61	84	62	76	71	95	12	71	61
	Liège	98	99	100	100	97	100	99	100	93	100	99	100
Sol perméable et récupération eau de pluie	Stockholm	98	99	100	100	97	100	96	100	93	100	99	100
	Lyon	98	99	100	100	98	100	98	100	93	100	99	100
	Barcelone	97	99	100	100	97	100	96	99	93	100	98	100
Panneaux solaires	Liège	104	101	103	85	99	105	95	103	100	100	102	105
	Stockholm	104	101	103	89	99	104	94	103	100	100	101	105
	Lyon	104	101	103	84	99	104	94	103	100	100	101	105
Mobilité	Barcelone	105	101	104	82	99	107	92	103	100	100	101	108
	Liège	102	100	103	86	97	104	94	103	93	100	100	105
	Stockholm	102	101	103	89	97	104	93	103	93	100	100	104
Panorama	Lyon	102	100	103	84	97	104	93	103	93	100	100	105
	Barcelone	102	100	104	82	96	106	90	103	93	100	99	107
	Liège	93	101	81	93	103	94	103	99	102	34	96	93
Mobilité	Stockholm	95	97	83	93	99	94	99	97	100	42	94	94
	Lyon	91	94	73	91	98	89	98	94	99	24	90	90
	Barcelone	82	91	52	88	98	76	97	89	99	1	85	77
Mobilité	Liège	99	97	99	101	100	99	99	99	100	100	98	96
	Stockholm	100	99	101	104	101	100	101	100	101	101	100	97
	Lyon	95	97	98	111	104	94	102	96	100	108	99	91
	Barcelone	99	96	99	100	100	99	98	98	100	100	98	93

Tableau 18 : Variation des impacts environnementaux de tous les scénarios étudiés pour chaque ville par rapport à sa propre situation initiale

Nous avons regroupé dans le tableau ci-dessous les variations relatives par rapport à la situation initiale de Liège. Les tableaux concernant les autres villes sont fournis en annexe. Les scénarios ont été classés par ordre d'influence dans l'impact environnemental.

Scénario	Liège
Remplacement des châssis et isolation des parois	237
Isolation des parois	162
Augmentation du taux d'énergie renouvelables	111
Panneaux solaires	109
Remplacement des châssis	29
Sols perméables	16
Sol perméable et récupération eau de pluie	13
Mobilité	13
Récupération eau de pluie	-3

Tableau 19 : Variations relatives de l'impact des différents scénarios à Liège

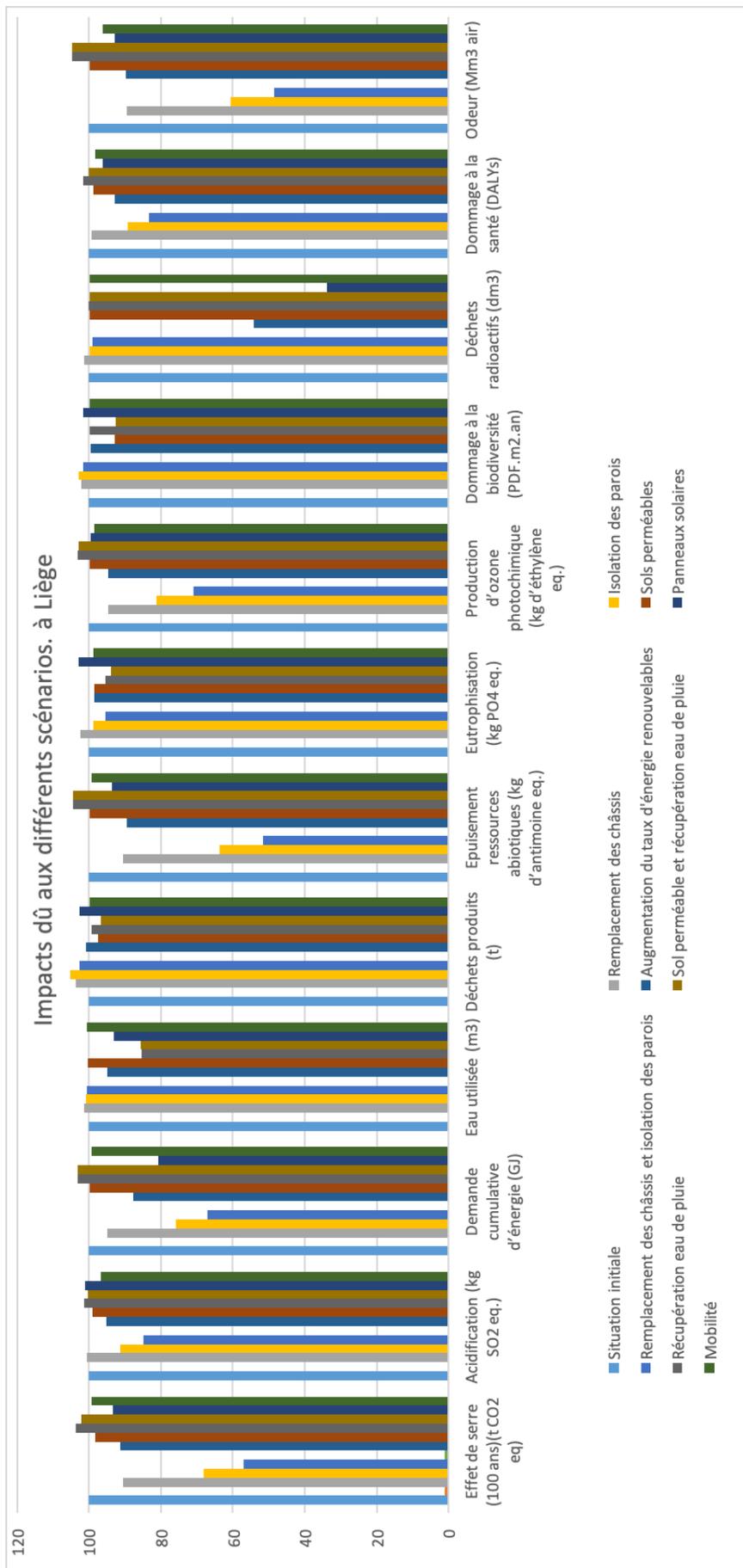


Figure 31 Impacts dû aux différents scénarios à Liège

D'après le tableau et le graphique précédent, quatre scénarios se distinguent. Tout d'abord, le remplacement des châssis et l'ajout d'isolant est le scénario qui fait diminuer le plus les impacts au niveau des indicateurs effets de serre (43%), acidification (15%), demande cumulative d'énergie (33%), épuisement des ressources abiotiques (48%), la production d'ozone photochimique (29%), dommage à la santé (17%) et odeur (51%). Comme nous l'avons déjà souligné, une bonne isolation est primordiale pour diminuer les besoins énergétiques des bâtiments. Effectivement cela représente un coût financier mais il peut être rentabilisé sur le long terme, de plus de nombreuses aides financées par l'état encouragent les travaux de rénovation dans ce sens. Ainsi, les consommations énergétiques sont également réduites, et moins de ressources naturelles sont puisées, générant ainsi beaucoup moins de dommages à l'environnement. Par ailleurs, isoler sérieusement sa maison réduit l'effet de serre et l'épuisement des ressources abiotiques d'environ 40% de plus que d'installer des panneaux solaires photovoltaïques par exemple.

Deuxièmement, l'isolation des parois seuls permet de diminuer également considérablement l'impact des mêmes indicateurs cités précédemment. D'où l'occasion de souligner une fois de plus l'importance à accorder à ce scénario.

Ensuite, l'augmentation du taux d'énergies renouvelables présente un bilan assez positif du point de vue environnemental. En effet, le mix énergétique de la Suède a été simulé pour les quatre villes. Or il se trouve que celui-ci puise 99,6% de son électricité dans le nucléaire et 0,4% dans le fioul alors que le mix énergétique belge utilise un peu plus de 60% de nucléaire, 12% d'hydraulique et 27% de gaz. C'est pour cette raison que ce scénario a permis de réduire de moitié les déchets radioactifs. Même si aujourd'hui la Belgique est encore loin du mix énergétique suédois, ces résultats doivent être une source de motivation pour accélérer le changement.

Puis, toujours dans la domaine des énergies plus propres, mais à petite échelle cette fois-ci, le quatrième scénario le plus influant était l'installation de panneaux solaires photovoltaïques. L'indicateur le plus touché par ce scénario est la production de déchets radioactifs. Comme précédemment, le mix belge est responsable de ces résultats. D'autant plus que l'impact de cet indicateur aurait pu être réduit si l'orientation et l'inclinaison de nos panneaux étaient optimales. En revanche, il se pourrait également que ce manque à gagner soit compensé par la surface de de panneaux que nous avons utilisés. En effet, nous avons installé des panneaux sur 2/3 de la surface de toiture disponible.

Le scénario remplacement des châssis a permis de diminuer les besoins énergétiques et ainsi l'épuisement des ressources naturelles surtout pour l'effet de serre et l'épuisement des ressources abiotiques. Une fois de plus, l'importance est mise sur le poste de consommation énergétique qu'il faut à tout prix réduire.

La mobilité est un sujet de plus en plus présent dans l'actualité. A l'heure où les villes se densifient, l'utilisation de véhicules privés devient

problématique. Les embouteillages, sont de plus en plus nombreux, les distances étant pourtant courts, les temps de trajets augmentent. Tout ceci génère malheureusement encore plus de pollution, plus de dommage à l'environnement mais également à la santé humaine. De plus en plus de personnes ont des maladies respiratoires, la qualité de l'air dans les villes les rend invivables. Notre scénario initial étant déjà situé en zone urbaine, nous avons seulement augmenté à 100% le nombre des habitants effectuant le trajet journalier et diminuer légèrement les trajets domicile-travail et domicile-commerce. Cette faible variation a quand même permis de réduire de quelques pourcents tous les indicateurs.

Enfin les scénarios concernant la gestion des eaux semblent ne pas avoir eu beaucoup d'impact. La perméabilité des sols qui a été possible seulement sur une toute petite surface a dans une moindre mesure réduit l'impact des différents indicateurs. Cependant, le système de récupération des eaux de pluie a permis de réduire de 15% la consommation d'eau. Elle aurait pu être davantage réduite si nous possédions une surface de récupération d'eau de pluie plus importante. Elle a également réduit l'impact de l'eutrophisation mais sur le bilan complet, elle a généré plus de dommage que d'intérêts à l'environnement.

PARTIE 17 | CONCLUSION

Nous avons au total réalisé 11 scénarios de simulation pour 4 villes européennes situées dans des zones climatiques différentes. L'enjeu était de mesurer l'influence du climat dans un premier temps sur les différentes solutions de rénovation puis d'analyser l'impact de ces solutions de rénovation dans chaque ville.

Pour cela la méthode de l'ACV bien que complexe et limitée à l'échelle du quartier s'est avérée être un outil efficace et nous a permis de dégager quelques conclusions qui pourraient être approfondies par des études plus poussées.

Tout d'abord concernant l'influence du climat, nous avons mis en avant qu'il n'avait pas vraiment d'impact sur les indicateurs suivants : déchets radioactifs, dommages à la biodiversité et déchets produits. En effet quel que soit le scénario, dans la plupart des cas les résultats pour ces indicateurs étaient presque identiques.

Ensuite, une relation inverse entre la température des régions étudiées et les impacts environnementaux s'est dessiné au fil des résultats. Cette relation s'explique par les besoins de chauffage qui sont moins importants dans les climats chauds. Cependant, un besoin de refroidissement est plus important dans ces climats. Il pourrait être intéressant d'étudier donc ce paramètre lors des travaux ultérieurs.

Puis, concernant les scénarios étudiés, l'isolation est le poste qui a permis de réduire l'impact des tous les indicateurs. En effet, comme nous l'avons précisé précédemment, lorsque les besoins de chauffage sont moins importants, parallèlement les dommages à l'environnement se retrouvent réduits. Ainsi, avant de vouloir utiliser des sources d'énergies renouvelables, à plus petite échelle, il est déjà possible d'agir en investissant sur l'isolation des bâtiments.

A plus grande échelle, suivre les objectifs européens et réduire ses émissions de gaz à effet de serre, réduire l'utilisation du nucléaire et pour cela adopter un mix énergétique plus propre est tout à fait possible. En effet, le mix énergétique suédois composé à plus de 99% d'énergies renouvelables rend tout à fait atteignable cet objectif. Dans notre cas il a réduit de 50% la production de déchets radioactifs à Liège.

D'après les résultats issus de l'état de l'art, la mobilité n'a pas engendré l'impact qui était attendu dans ce domaine clé. Ceci pointe peut-être sur une des limites du logiciel. En plus de ceux précisés dans la partie précédente, nous pouvons ajouter que le logiciel ne prend pas en compte les déplacements aériens.

En effet, à l'heure où les compagnies de vol low-cost font le bonheur des budgets serrés, malheureusement l'augmentation du trafic aérien

engendre d'énormes dommages à l'environnement. Les pays nordiques se vantant de la propreté de leur mix énergétique et l'efficacité thermique de leurs bâtiments, ils sont également ceux qui utilisent le plus l'avion à destination de pays exotiques pour le loisir. Tout ceci ne fait qu'aggraver la pollution de l'air, et ceci se répercute en dommages à l'environnement et à la santé des êtres-vivants. Le sujet est très intéressant et pourrait même faire l'objet d'un autre sujet de TFE.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, (2018) Les impacts environnementaux
<https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/elements-contexte/impacts-environnementaux>
- Allacker, K., (2010). *Sustainable building - the development of an evaluation method*. (Doctoral dissertation). Katholieke Universiteit Leuven, Leuven.
- 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.
- Colombert M., De Chastenot 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.
- 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.
- Démoutiez N. et Macquart H., (2009) Les grandes questions de l'environnement. Chapitre 4 : Environnement et société, fiche 34 : La prise de conscience environnementale p.84-85.
<https://www.eyrolles.com/Sciences/Livre/les-grandes-questions-de-l-environnement-9782846249294/>
- ELIA, (2016). Parc de production. Puissance installée actuelle agrégée par type de combustible.
<https://www.elia.be/fr/grid-data/production/parc-de-production>
- Eurostat, (2018). La consommation d'énergie.
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Consumption_of_energy/fr&oldid=396952
- France24, (2019, juin, 21). Alcyone WEMAËRE Neutralité carbone en 2050 : "une occasion manquée" pour l'UE
<https://www.france24.com/fr/20190621-climat-neutralite-carbone-2050-ue-pologne-hongrie-macron>
- Gracik S., Heidarinejad M., Liu J., Srebric J., (2015). Effect of urban neighborhoods on the performance of building cooling systems, *Build. Environ.* 90

<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.037>.

Herfray, G. (2011). Contribution à l'évaluation des impacts environnementaux des quartiers (*PhD dissertation*). Ecole supérieure Nationale des Mines de Paris, Paris.

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.

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.

Jolliet O., Soucy G., Houillon G., et al. (2010) Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan
https://books.google.be/books?hl=fr&lr=&id=g9S55CklsOoC&oi=fnd&pg=PR5&dq=analyse+du+cycle+de+vie&ots=BH-fLA85WI&sig=UX3_10vSoABLvxyHgsPWJmnCP0M#v=onepage&q=analyse%20du%20cycle%20de%20vie&f=false

Kameni M., Orosa J. A., Reiter S., (2019a) Life cycle assessment of two sustainable and old neighbourhoods affected by climate change in one city in Belgium : A review
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106282>

Kameni M., Asadi S., Reiter S. (2019b) A Study of Life Cycle Assessment in two Old Neighbourhoods in Belgium
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101744>

LEMA, (2012), Les Analyses en cycle de vie (ACV) : Introduction au cycle de vie des bâtiments
<http://solen-energie.be/medias/files/fiches/safebat09.pdf>

Libération (2009) 30 novembre 2009. *De 1970 à 2009, histoire d'une prise de conscience*.
https://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. (2015). 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>

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

Plster B., (1995), Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie
<http://www.theses.fr/1995ENMP0625>

Peuportier B., et al. (2006). *Contribution à l'analyse du cycle de vie des quartiers* (PhD dissertation) Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris, Paris.

Peuportier B., Roux C., (2013), Eco-design of urban settlements using LCA, in: LCA [avniR] Conf. 2013, Proc. 3rd Int. Conf. Life Cycle Approaches, 2013, pp. 1e6.

Popovici, E. (2006). *Contribution à l'analyse de cycle de vie des quartiers* (PhD dissertation) Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris, Paris.

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.

RED (2016) Red Electricica de Espana
<https://www.ree.es/en/datos/todate>

RTE (2016) Bilan électrique français 2016.
https://www.rte-france.com/sites/default/files/2016_bilan_electrique_synthese.pdf

Salomon T., Mikolasek R., Peuportier B., (2005). Outil de simulation thermique du bâtiment, COMFIE, de *Journée SFT-IBPSA, Outils de simulation thermo-aéraulique du bâtiment*, La Rochelle, 8p.

SEA (2016). Swedish Energy Agency

<https://www.energimyndigheten.se/en/news/2019/energy-in-sweden--an-overview-2018-can-now-be-downloaded-from-the-swedish-energy-agencys-website.-the-overview-of-statistics-provides-easily-accessible-information-about-developments-in-the-energy-sector-in-sweden/>

Servaes R., Allacker K., Debacker W., Delem L., De Nocker L., De Troyer F., Janssen A., Peeters K., Spirinckx C., et Van Dessel J. (2013). Profil environnemental des éléments de construction. OVAM, Malines.

Simonen K., (2014) Life Cycle Assessment. Pocket architecture : Technical design series. Chapitre 3. Routledge, London and New York
<https://doi.org/10.4324/9781315778730>

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.

Trigaux D., Allacker K., & De Troyer F, (2014). Model for the *Environmental Impact* Assessment of Neighbourhoods.

Vilches A., Garcia-Martinez A., Sanchez-Montanes B. (2016) Life cycle assessment (LCA) of builinf refurbishment : A literature review

T ABLE DES FIGURES

Figure 1 Consommation finale d'énergie des 28 Etats membres de l'UE, 2015 (en % du total sur la base des données en tonnes-équivalent pétrole) Source: Eurostat : https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_100a&lang=en	9
Figure 2 Phases de l'ACV (LEMA, 2012)	14
Figure 3 : Etapes du cycle de vie du quartier et les contributions associés (Lotteau et al. 2015)	21
Figure 4 : Localisation des villes d'étude	29
Figure 5: Localisation du quartier d'étude	30
Figure 6 : Vue aérienne rapprochée du quartier d'étude	31
Figure 7 : Chainage des entrées/sorties entre les outils d'évaluation (Peuportier et al., 2006)	35
Figure 8 : Modèle 3D du quartier créé sur PLEIADES, seul le bâtiment sélectionné apparaît en couleur	40
Figure 9 : Consommation d'énergie primaire et changement climatique; min, Q1, median, Q3 et valeurs maximales (Lotteau et al., 2015)	49
Figure 10 : Influence du climat dans l'ACV	52
Figure 10 Influence du climat sur l'impact environnemental de chaque paramètre	53
Figure 12 : Influence du climat sur l'impact du remplacement des châssis dans l'ACV	55
Figure 13 : Impact du remplacement des châssis dans l'ACV	56
Figure 14 : Influence du climat sur l'impact de l'isolation des parois dans l'ACV	58
Figure 15 : Influence de l'isolation des parois	59
Figure 16 : Influence du climat sur l'isolation des parois et le remplacement des châssis	61
Figure 17 : Impact de l'isolation des parois et le remplacement des châssis	62
Figure 12 : Impact du mix énergétique sur l'ACV	64
Figure 19 : Influence du climat sur l'impact de l'augmentation du taux d'énergie renouvelable sur l'ACV	66
Figure 20 : Impact de l'augmentation du taux d'énergie renouvelable dans l'ACV	67
Figure 21 : Influence du climat sur l'impact de la perméabilisation des sols dans l'ACV	69
Figure 22 : Impact de la perméabilisation des sols	70
Figure 23 : Impact de la perméabilisation des sols sur l'ACV	71
Figure 24 : Impact de la récupération des eaux dans l'ACV	72
Figure 25 : Influence du climat sur l'impact de la perméabilisation des sols et récupération de l'eau de pluie dans l'ACV	73
Figure 26 : Impact de la perméabilisation des sols et récupération de l'eau de pluie dans l'ACV	74
Figure 27 : Influence du climat sur l'impact de l'installation des panneaux solaires photovoltaïques dans l'ACV	77
Figure 28 : Impact de l'installation des panneaux solaires photovoltaïques dans l'ACV	78

Figure 29 : Influence du climat sur l'impact de la mobilité dans l'ACV	80
Figure 30 : Impact de la mobilité dans l'ACV	81
Figure 31: : Variations relatives de chaque ville par rapport à Liège selon les différents scénarios	86
Figure 32 Impacts dû aux différents scénarios à Liège.....	89

T ABLE DES TABLEAUX

Tableau 1: Composition des parois	38
Tableau 2 : État de surface des parois.....	38
Tableau 3 : Valeurs caractéristiques des menuiseries.....	39
Tableau 4 : Ponts thermiques.....	39
Tableau 5 : Puissances dissipées	41
Tableau 6 : Besoins de chauffage de chaque bâtiment situé à Liège	42
Tableau 7 : Résultats de l'ACV du bâtiment C1 situé à Liège	45
Tableau 8: Résultats de l'ACV à l'échelle du quartier initial, localisé à Liège	48
Tableau 9 : Pourcentage de contribution de chaque phase dans l'impact environnemental pour le quartier localisé à Liège	50
Tableau 10 : Résultats de la STD: cas initial.....	51
Tableau 11 : Résultats de la STD après le remplacement des châssis.....	54
Tableau 12 : Résultats de la STD après l'ajout d'isolant sur les parois.....	57
Tableau 13 : Résultats de la STD après l'ajout d'isolant sur les parois et le remplacement des châssis.....	60
Tableau 14 : Couverture des panneaux solaires dans la production d'électricité..	76
Tableau 15 : Variation des impacts environnementaux de tous les scénarios étudiés par rapport au cas initial de Liège.....	83
Tableau 16 : Sommes des pourcentages des variations en valeurs absolues entre Liège et les autres villes	84
Tableau 17 : Variations relatives de chaque ville par rapport à Liège selon les différents scénarios	85
Tableau 18 : Variations relatives de l'impact des différents scénarios à Liège	88

ANNEXES

Les annexes sont disponibles en version numérique, téléchargeable sur le site matheo.uliege.be