

---

# Étude de la répartition des émissions de carbone des projets d'aménagement

---

21/12/2022



UrbanPrint

---

Institut  
de Recherche  
& Développement  
pour la  
Transition  
Énergétique  
de la Ville

---

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie

**Ce document a été réalisé par les équipes du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et par Efficacity**

**Ce document est diffusé par Efficacity**

Cité Descartes – Bâtiment Bienvenüe

14, boulevard Newton

77420 Champs-sur-Marne

## Table des matières

<b>Introduction</b> .....	<b>4</b>
<b>1. Poids carbone par contributeurs</b> .....	<b>8</b>
<b>1.1. Émissions du quartier (bâtiments et espaces extérieurs)</b> .....	<b>8</b>
<b>1.2. Mobilité</b> .....	<b>12</b>
<b>2. Distinction entre bâtiments et espaces extérieurs</b> .....	<b>12</b>
<b>3. Influence du contexte géographique</b> .....	<b>14</b>
<b>3.1. Influence de la zone climatique</b> .....	<b>14</b>
<b>3.2. Influence des disparités territoriales</b> .....	<b>16</b>
<b>4. Influence de la programmation (collectivité)</b> .....	<b>18</b>
<b>4.1. Usage des bâtiments</b> .....	<b>18</b>
<b>4.2. Imperméabilisation des sols</b> .....	<b>19</b>
<b>4.3. Compacité du quartier</b> .....	<b>21</b>
<b>5. Influence de la stratégie de mise en œuvre (aménageur)</b> .....	<b>22</b>
<b>5.1. Les leviers d'action</b> .....	<b>22</b>
<b>5.2. Matériaux biosourcés</b> .....	<b>24</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>25</b>
<b>Annexe 1 : liste des projets de l'échantillon</b> .....	<b>27</b>
<b>Annexe 2 : projet de référence</b> .....	<b>28</b>
<b>Annexe 3 : L'utilisateur équivalent</b> .....	<b>30</b>
<b>Annexe 4 : Exemple de résultats – le projet Issy Cœur de Ville (modélisé en 2021 avec la première version d'UrbanPrint)</b> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

## Introduction

---

Cette note présente l'étude de la répartition des émissions de carbone au sein des projets d'aménagement urbain. Cette étude s'appuie sur l'application de la méthode Quartier Energie Carbone (QEC) sur 30 projets (cf. **Annexe 1**) modélisés grâce au logiciel UrbanPrint<sup>1</sup>.

Les 30 projets sont majoritairement performants car ils proviennent de dispositifs ayant valorisé des projets plutôt ambitieux :

- L'AMI Quartier Energie Carbone et Ecoquartiers (15 projets)<sup>2</sup> ;
- L'expérimentation Quartier Energie Carbone de l'ADEME (4 projets)<sup>3</sup> ;
- Le projet Quartier E+C- de l'ADEME (7 projets)<sup>4</sup> ;
- Et d'autres opérations pilotes ambitieuses ayant noué des partenariats de R&D avec Efficacity et le CSTB (4 projets).

Les projets modélisés sont variés avec des projets résidentiels, tertiaires, mixtes, neufs, de rénovation, etc. Les périmètres d'étude des projets (bâtiments + espaces extérieurs) sont également très disparates, allant de 5000 m<sup>2</sup> à 42 Ha. Enfin, les projets étudiés sont majoritairement localisés en région parisienne ou en zone urbaine dense.

### La méthode Quartier Energie Carbone

La méthode Quartier Energie Carbone (QEC) a été mise au point par un groupe d'acteurs spécialistes de la mesure des impacts environnementaux (CSTB, Efficacity et ses partenaires dont le CEREMA, l'Alliance HQE-GBC, Effinergie, Certivéa, Elioth, l'Association BBKA) dans le cadre d'un appel à projets de recherche de l'ADEME afin de s'inscrire dans la dynamique de ce qui était à l'époque la future RE2020 et permettre d'élargir l'échelle en passant du bâtiment au quartier. Développée depuis 2018, cette méthode permet aujourd'hui d'accompagner des opérations d'aménagement neuves et/ou en rénovation.

Le passage de l'échelle du seul bâtiment au projet d'aménagement opérationnel permet d'intégrer les différents acteurs : collectivité, aménageur, promoteur, voire gestionnaire de réseaux et usagers. Cette échelle permet également la recherche d'optimisation sur des leviers tels que : la mise en place de réseaux de chaleur, la mutualisation de la production d'ENR et l'autoconsommation collective, la mutualisation des usages, la mixité programmatique, la mobilité du quartier, etc.

La méthode Quartier Energie Carbone s'appuie sur les principes de l'analyse de cycle de vie (norme EN15804) et évalue la performance énergie-carbone du quartier et de chaque objet décrit (bâtiment ou espace extérieur) sur la base des six contributeurs suivants :

- **Energie** : impacts liés aux consommations énergétiques du quartier en phase d'exploitation (chauffage, ventilation, éclairage, etc.).
- **Produits de construction** : impacts liés à la construction, l'entretien et la fin de vie des bâtiments et des espaces extérieurs. Les équipements liés aux systèmes énergétiques sont également inclus dans ce contributeur.
- **Eau** : impacts liés aux consommations d'eau potable et au traitement des eaux usées du quartier.

---

<sup>1</sup> Méthode d'évaluation en Analyse de Cycle de Vie (ACV) des impacts environnementaux d'un projet d'aménagement urbain. <https://efficacity.com/quartiers-bas-carbone/nos-logiciels/urbanprint/>

<sup>2</sup> <http://www.ecoquartiers.logement.gouv.fr/actualite/ami-quartier-energie-carbone-30-projets-selectionnes/>

<sup>3</sup> <https://experimentationsurbaines.ademe.fr/quartiers-e-c/>

<sup>4</sup> <https://experimentationsurbaines.ademe.fr/recherche-et-developpement/projet/quartier-ec/>

- **Déchets** : impacts liés aux déchets produits par le quartier en exploitation<sup>5</sup> (bâtiments + espaces extérieurs) incluant le transport, le traitement et la d'éventuelles revalorisation.
- **Mobilité quotidienne** : impacts liés à la mobilité quotidienne des usagers du quartier et impacts des voiries de dessertes.
- **Chantier et usage des sols** : impacts liés au chantier (terrassment, mise en œuvre du chantier) et au changement d'usage des sols.

Les impacts associés à l'exploitation du bâtiment (maintenance, consommations d'énergie et d'eau, etc.) sont sensibles au choix de la période de référence, dans la pratique une durée de vie de 50 ans est généralement utilisée pour le calcul. Il a été choisi de transposer cette durée de référence de 50 ans pour l'évaluation des opérations d'aménagement.

La méthode propose également une évaluation de l'impact carbone total du futur habitant en incluant en plus des contributeurs précédents : biens de consommation, voyage longue distance, transport de marchandise et alimentation.

La méthode, publiée dans la librairie de l'ADEME<sup>6</sup>, constitue un socle de calcul solide et complet, validé par de nombreux acteurs de l'aménagement et servant dès à présent de base de calcul au récent label BBKA Quartier<sup>7</sup>. Dans une logique d'amélioration continue, cette méthode, évolutive et publique, intégrera, au fur et à mesure de son déploiement, les nouvelles connaissances sur les leviers d'actions et innovations ayant un fort impact carbone<sup>8</sup>. Elle a pour principe d'intégrer l'ensemble des solutions matures existantes.

### Indicateurs présents dans la méthode Quartier Energie Carbone

La performance énergie-carbone au sein de la méthode QEC est évaluée à travers différents indicateurs parmi lesquels :

- **Les « score énergie » et « score carbone » qui permettent de situer les performances du projet étudié par rapport à une référence** définie par la méthode et adaptée au contexte puisqu'il s'agit du même projet (même localisation, même programme et même forme urbaine) auquel on applique des niveaux de performance « business as usual », des matériaux classiques (béton, acier), une performance énergétique au minimum réglementaire (RT2012 puis RE2020), etc.

**Le projet de référence** n'inclut donc aucun effort environnemental supplémentaire par rapport à ce qui est couramment fait ou imposé par les réglementations. Pour plus de précisions, les caractéristiques du projet de référence sont détaillées dans l'**Annexe 2**. Ces scores peuvent être facilement visualisés avec un histogramme montrant la contribution des principales composantes du projet (exemple du score carbone sur la **Figure 1**). Au sein de cette note, afin de prendre en compte des projets plus représentatifs de la moyenne nationale, les résultats des projets de référence sont également présentés.

---

<sup>5</sup> Les déchets de chantier sont comptabilisés dans le contributeur chantier

<sup>6</sup> Méthode Quartier Energie Carbone : <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5802-methode-quartier-energie-carbone.html>

<sup>7</sup> Label BBKA Quartier : Le label BBKA Quartier introduit également la notion d'usager équivalent, permettant de prendre en considération l'impact non pas uniquement du futur habitant mais également des autres usagers du projet - salarié, commerçant, etc. - en élaborant une pondération entre ces différents usagers. Cela permet de calculer l'indicateur par exemple un nouvel indicateur, IcQ\_aménagement, qui correspond aux impacts totaux du quartier ramenés à un usager équivalent (Useq), exprimés en kgCO<sub>2</sub>e/Useq/an. [https://www.batimentbas carbone.org/wp-content/uploads/2022/06/22-06-14\\_Communique-de-presse-BBKA-Lancement-du-Label-BBKA-QUARTIER-au-SIBKA-sept-2022.pdf](https://www.batimentbas carbone.org/wp-content/uploads/2022/06/22-06-14_Communique-de-presse-BBKA-Lancement-du-Label-BBKA-QUARTIER-au-SIBKA-sept-2022.pdf)

<sup>8</sup> Des évolutions sont déjà envisagées prochainement sur la mobilité, l'aménagement des espaces extérieurs, la biodiversité.

- « **L'atteinte du potentiel** » qui permet d'identifier, grâce à la génération et l'analyse de plusieurs centaines de simulations, les leviers d'action pouvant encore être mobilisés et leur impact carbone (ce qui permet de connaître le « scénario optimal ») et donc d'évaluer l'effort déjà accompli pour atteindre ce potentiel maximal de décarbonation. Cette analyse fournit également une aide à la décision très précieuse pour améliorer encore la performance carbone du projet.
- **L'empreinte carbone totale d'un futur habitant du quartier**, exprimée en kgCO2e/habitant/an, permet de valoriser les actions autres que celles mises en œuvre par l'aménageur, telles que les achats de biens de consommation, l'alimentation, etc.

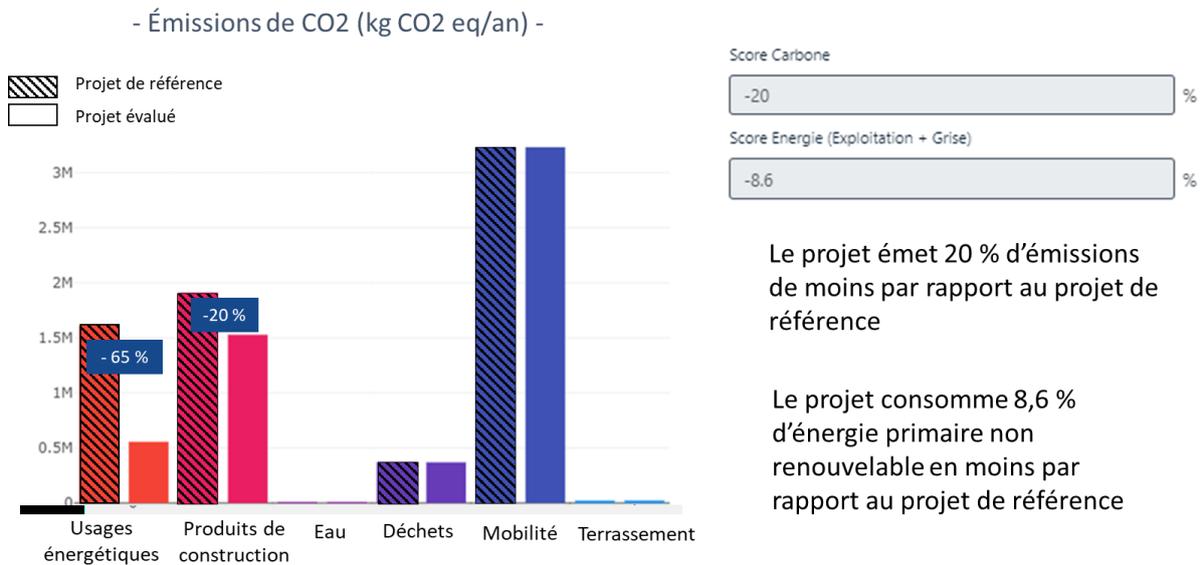


Figure 1 : Exemple de résultats avec l'indicateur « émissions de CO2 » sur différents contributeurs présents dans la méthode quartier énergie carbone et les scores Carbone et Énergie.

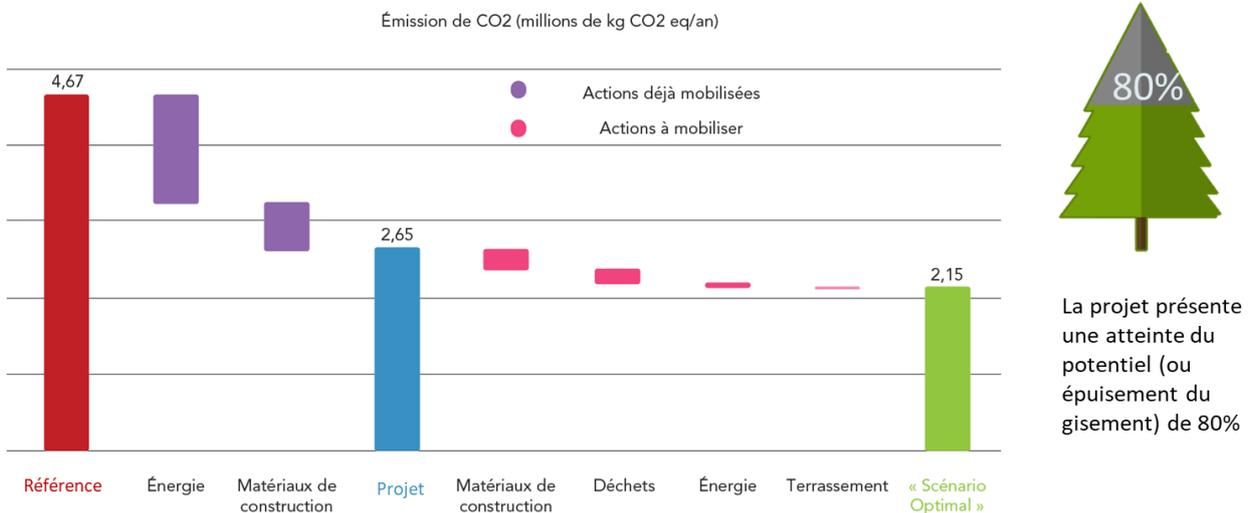


Figure 2 : Exemple de résultats avec l'indicateur « atteinte de potentiel » et l'identification des leviers d'actions mobilisés ou à mobilisés pour aller vers le projet optimal (diagramme de Shapley à gauche)

## Impact carbone ramené à l'utilisateur équivalent

En faisant l'hypothèse que l'impact carbone d'un quartier résulte des services offerts aux utilisateurs de ce dernier, le label BBCA<sup>9</sup> Quartier propose de ramener l'impact quartier à l'utilisateur équivalent (utilisateur « moyen » du quartier, tous usages confondus : cf. **Annexe 3**).

Dans cette note, il a été considéré que l'impact à l'utilisateur équivalent, unique variable commune à tous les contributeurs du quartier, constitue un référentiel plus pertinent à l'échelle du projet d'aménagement que l'impact par m<sup>2</sup>. De plus, l'impact à l'utilisateur équivalent permet de valoriser toutes les actions de mutualisation et facilite les comparaisons entre projets très variés (mix d'activités, taille ou localisation différentes) et aux objectifs nationaux. Pour le calcul de l'impact à l'utilisateur équivalent, le périmètre considéré inclut uniquement les ouvrages et services urbains sous la responsabilité de l'aménageur.

## Représentation des données : la boîte à moustache

Au vu des disparités entre les 30 projets et la faiblesse de la taille de cet échantillon, il n'apparaît pas pertinent de calculer des moyennes des bilans de chaque projet. Une approche en quartile a été préférée avec une représentation par des boîtes à moustache. Le schéma de la **Figure 3** récapitule la construction d'une boîte à moustache.

Pour rappel :

- Le 1<sup>er</sup> Quartile représente la valeur en-dessous de laquelle 25 % de l'échantillon est représenté.
- Le 2<sup>ème</sup> Quartile, ou médiane, représente la valeur qui sépare l'échantillon en deux (50 % de l'échantillon se trouve en-dessous de cette valeur et 50 % de l'échantillon se trouve au-dessus de cette valeur).
- Le 3<sup>ème</sup> Quartile représente la valeur en dessous de laquelle 75% de l'échantillon est représenté.

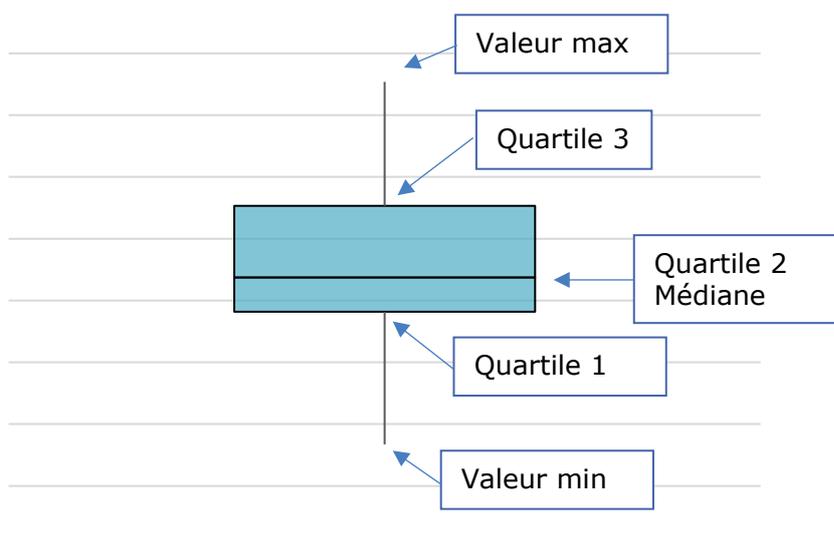


Figure 3 : Présentation de la "boîte à moustache"

<sup>9</sup> <https://www.batimentbas carbone.org/bbca-quartier/>

## 1. Poids carbone par contributeurs

Afin de vous présenter l'échantillon, il est intéressant d'analyser leurs scores carbone et énergie. La **Figure 4** montre la répartition de ces scores avec ou sans la part relative au contributeur Mobilité. Ainsi plus de 50 % des projets étudiés ont réduit d'au moins 20 % leurs émissions carbone et d'au moins 10 % leurs consommations d'énergie primaire non renouvelable par rapport à leur projet de référence.

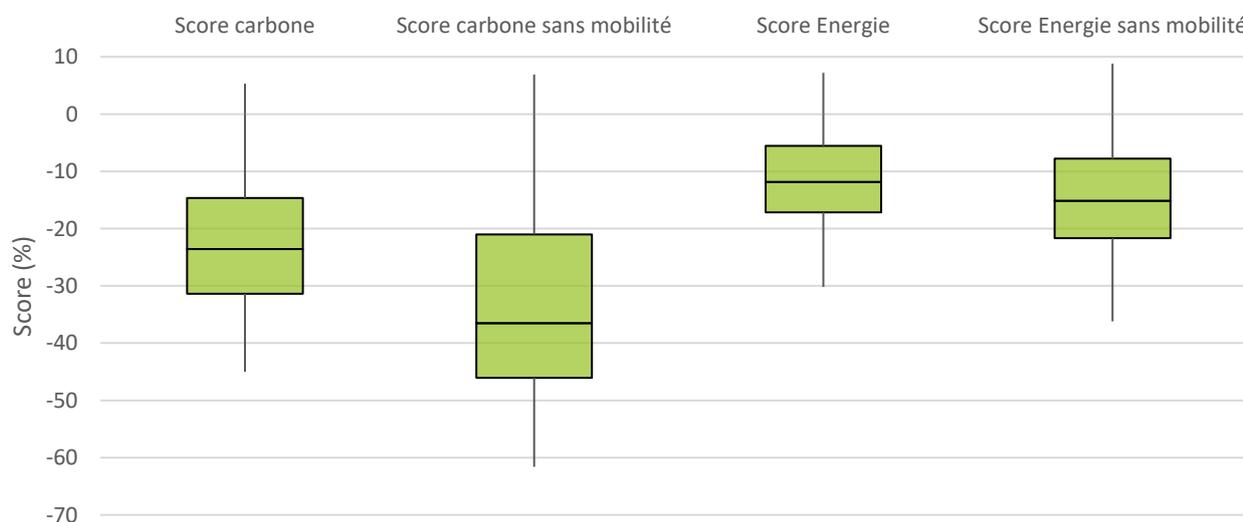


Figure 4 : Répartition des scores carbone (%) et scores énergie (%) des quartiers étudiés

### 1.1. Émissions du quartier (bâtiments et espaces extérieurs)

UrbanPrint permet de calculer les émissions de CO<sub>2</sub> totales d'un projet d'aménagement selon deux méthodes : la méthode dynamique simplifiée de type RE2020 (pondération des émissions dans le temps) et la méthode statique (toutes les années ont le même poids).

Les parts des émissions totales associées à chaque contributeur ont été calculées à partir des résultats de la méthode statique. Ces parts sont présentées à la **Figure 5**. Pour la plupart des projets d'aménagement, les trois principaux postes d'émissions de CO<sub>2</sub> sont l'Énergie, les Produits de construction et la Mobilité. Cependant, l'importance relative de ces contributeurs varie d'un projet à l'autre. Pour les projets ayant diminué drastiquement leur impact sur le poste Énergie, le poste Déchets devient le 3<sup>ème</sup> poste plus important.

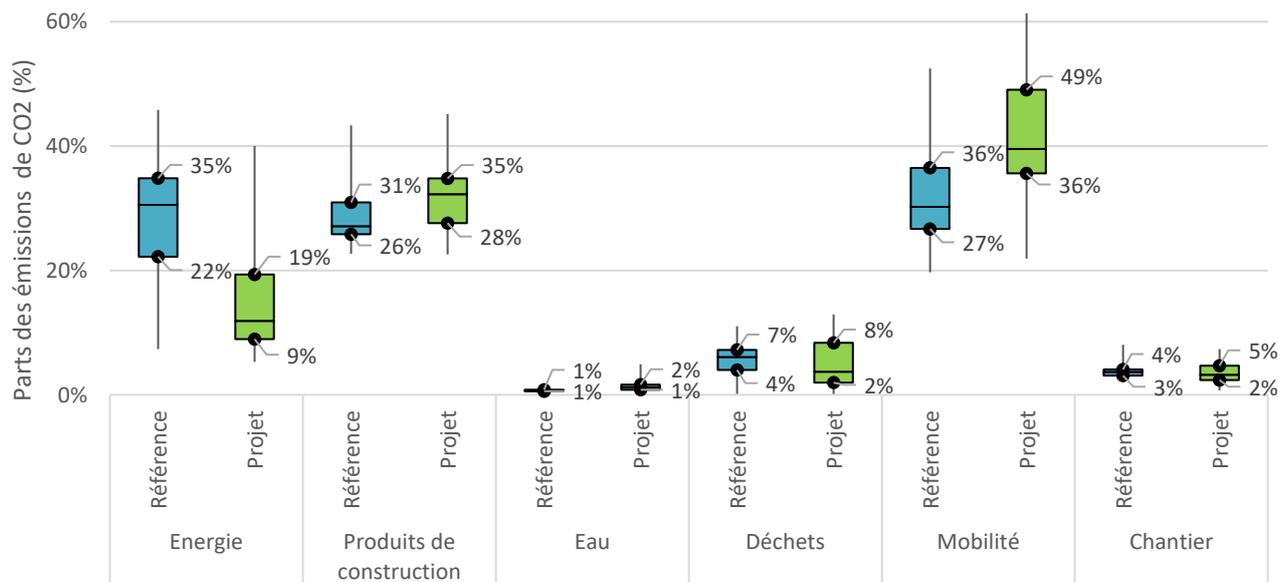


Figure 5 : Parts des émissions de CO2 par contributeur (méthode statique)

Il est également intéressant de présenter la répartition des impacts par contributeur en ramenant les émissions de CO2 à l'usager équivalent (useq) et par an. Cela permet de rendre compte du poids réel, et non relatif de chaque contributeur.

La **Figure 6** présente les répartitions des émissions de CO<sub>2</sub> pour chaque contributeur rapportées à un usager équivalent et par an (méthode statique). L'Énergie est le poste pour lequel il y a la plus grande réduction des émissions de gaz à effet de serre entre les projets et leur référence. En effet, 75 % des projets émettent moins de 0,24 tCO<sub>2</sub>eq/useq/an pour ce poste contre 0,66 tCO<sub>2</sub>eq/useq/an pour les projets de référence. Contrairement à la **Figure 5**, la comparaison en absolu de la **Figure 6** montre qu'il existe également une réduction importante des émissions de gaz à effet de serre pour le contributeur Produit de Construction entre les projets et leur référence.

*Figure 6 : Émissions de CO2 par usager équivalent et par an liées aux différents contributeurs (méthode statique)*

En **Figure 7** sont présentées les émissions de CO2 par usager équivalent et par an avec la méthode dynamique. Avec

## Répartition des émissions de carbone des projets d'aménagement

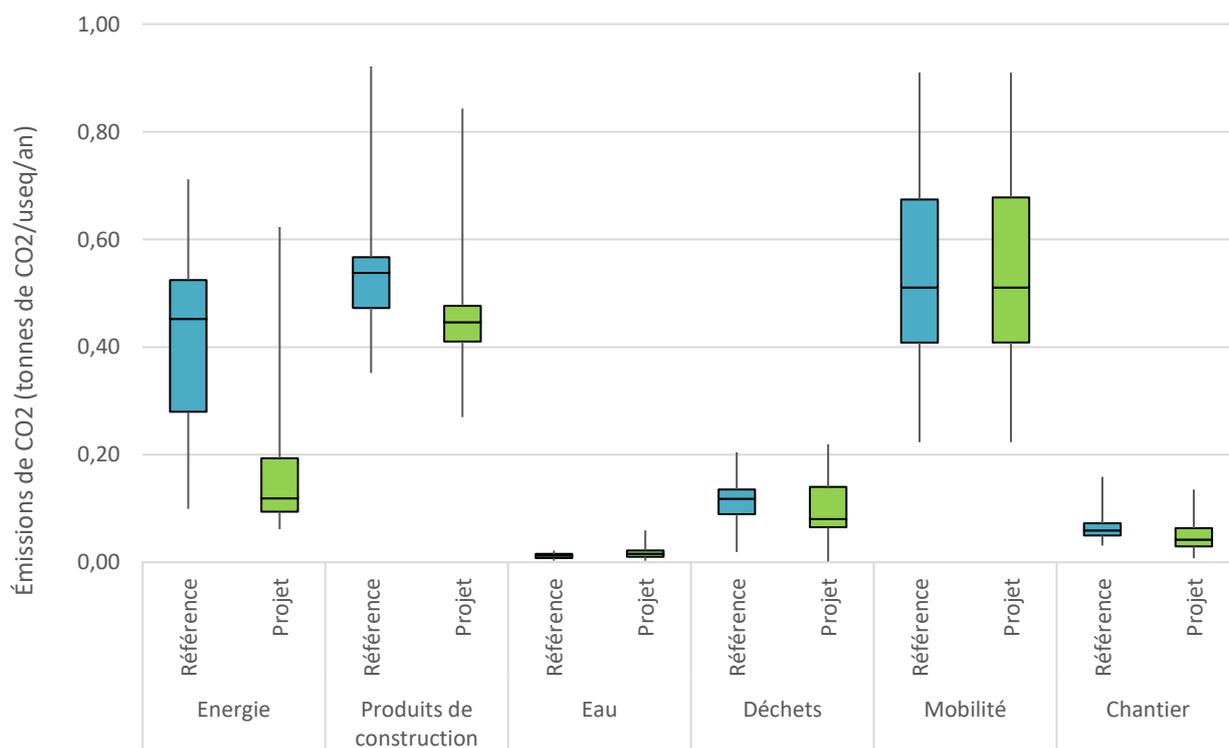


Figure 7 : Émissions de CO2 par usager équivalent et par an liées aux différents contributeurs (méthode dynamique)

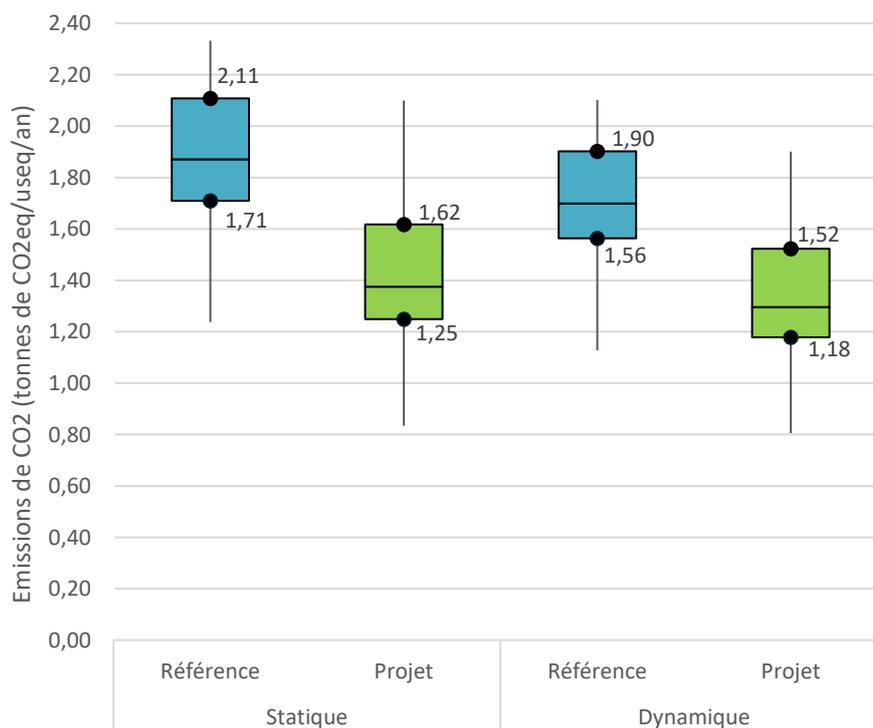


Figure 8 : Comparaison des émissions de CO2 totales par usager équivalent et par an obtenues avec la méthode statique et la méthode dynamique

Pour le reste de cette étude, afin de simplifier les résultats, nous avons choisi d'utiliser uniquement la méthode statique. Cependant ces mêmes résultats peuvent être présentés avec la méthode dynamique au sein d'UrbanPrint.

## 1.2. Mobilité

Il faut noter que sur la **Figure 6** et la **Figure 7**, la mobilité ne varie pas entre les projets et les projets de référence car aujourd'hui la méthode QEC et UrbanPrint n'intègrent pas de leviers permettant de diminuer les impacts liés à ce contributeur. Des travaux sont en cours pour améliorer ce point.

La méthode de calcul n'intègre également pas de scénario d'évolution prospective comme l'augmentation de la part des véhicules électriques dans le parc automobile. Ainsi, lorsqu'un scénario représentatif des évolutions à venir sera pris en compte, la part de la mobilité dans les émissions d'un quartier sera sûrement diminuée.

La section **Influence des disparités territoriales** permet de visualiser les écarts entre des zones plus ou moins bien desservies en transport en commun.

## 2. Distinction entre bâtiments et espaces extérieurs

---

Dans cette section, la comparaison entre les projets et leur référence n'est pas présentée puisque les émissions des projets de référence ne sont pas disponibles à ce niveau de détail. Ainsi, ces résultats correspondent à des valeurs de projets plutôt performants. Dans cette section le contributeur chantier n'apparaît pas car les calculs ne permettent pas de distinguer les impacts de terrassement liés aux espaces extérieurs de ceux liés aux bâtiments. En effet, le réemploi des terres excavées étant pris en compte, il n'y a pas d'attribution spécifique de ce réemploi à certains bâtiments ou espaces extérieurs. En revanche, le changement d'affectation des sols a pu être ajouté.

L'action de réaliser des espaces extérieurs (voiries, espaces privés et publics et équipements publics) et celle de réaliser des bâtiments ne sont pas comparables en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>. En effet, comme présenté à la **Figure 9** et à la **Figure 10**, les émissions totales liées aux bâtiments, ramenées au nombre d'utilisateurs équivalents et par an, se situent entre environ 0,8 et 2 tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent. Or pour les espaces extérieurs la fourchette est plutôt située entre 0 et 0,2 tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent par utilisateur équivalent et par an. Cela s'explique par le fait que la quantité de matériaux nécessaire pour construire un bâtiment est largement supérieure à celle des espaces extérieurs. Également pour l'énergie, l'eau et les déchets, les besoins d'un bâtiment sont bien supérieurs à ceux des espaces extérieurs.

La répartition des émissions des bâtiments par contributeur suit la même tendance que celle à l'échelle du quartier. Cela s'explique par l'importance des impacts des bâtiments par rapport à ceux des espaces extérieurs. L'impact du changement d'usage des sols dû à la construction d'un bâtiment est souvent nul car, sur la plupart des projets, ils sont construits sur des surfaces déjà imperméabilisées. De plus, l'ordre de grandeur de ces émissions est très faible comparé aux autres contributeurs d'émissions, donc la **Figure 9** rend peu compte de cet impact.

Le contributeur mobilité intègre :

- Les impacts liés à la mobilité quotidienne des usagers du quartier. Ces impacts sont comptabilisés au niveau des bâtiments (cf. contributeur Mobilité de la **Figure 9**).
- Les impacts des voiries de desserte (routes ayant comme principale fonction de desservir le quartier). Ces impacts sont comptabilisés au niveau des espaces extérieurs (cf. contributeur Mobilité de la **Figure 10**).

Pour les espaces extérieurs, les Produits de construction (PCE) et les déchets en phase d'exploitation<sup>10</sup> sont les contributeurs les plus importants. L'impact du stockage/déstockage

---

<sup>10</sup> Le poste Déchets n'intègre pas les déchets de chantier

carbone lié au changement d'usage des sols est assez faible dans l'échantillon étudié. Cependant, il est à noter que le minimum de notre échantillon se situe à  $-0,013$  tCO<sub>2</sub>/useq/an, ce qui n'est pas négligeable comparé aux émissions totales des espaces extérieurs.

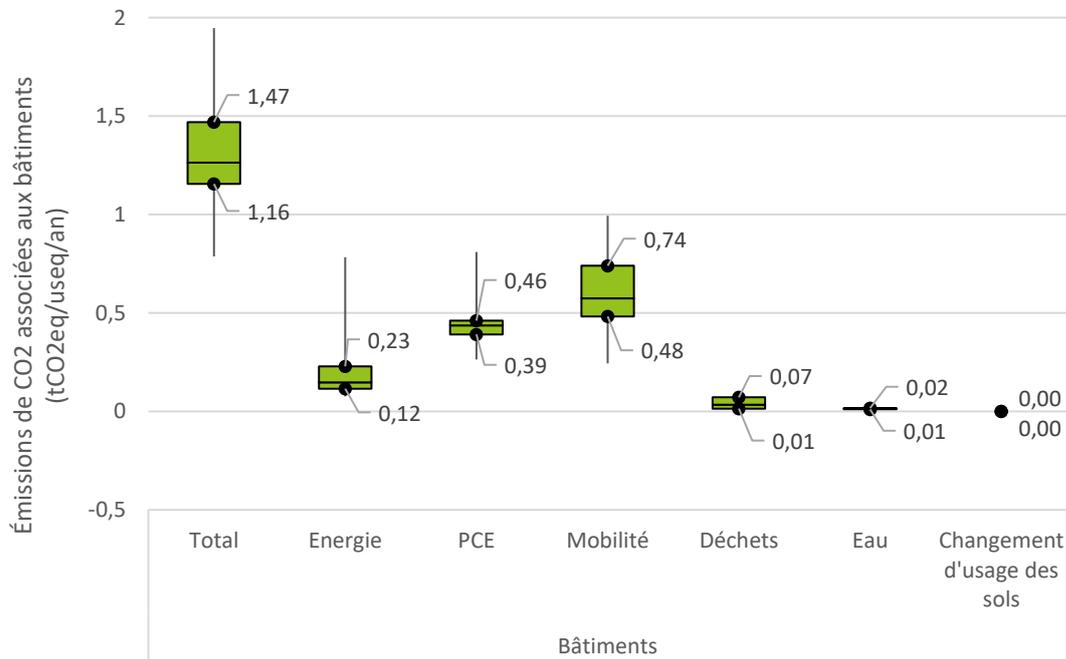


Figure 9 : Répartition des émissions liées aux bâtiments par contributeur, en tonnes de CO<sub>2</sub> par usager équivalent par an

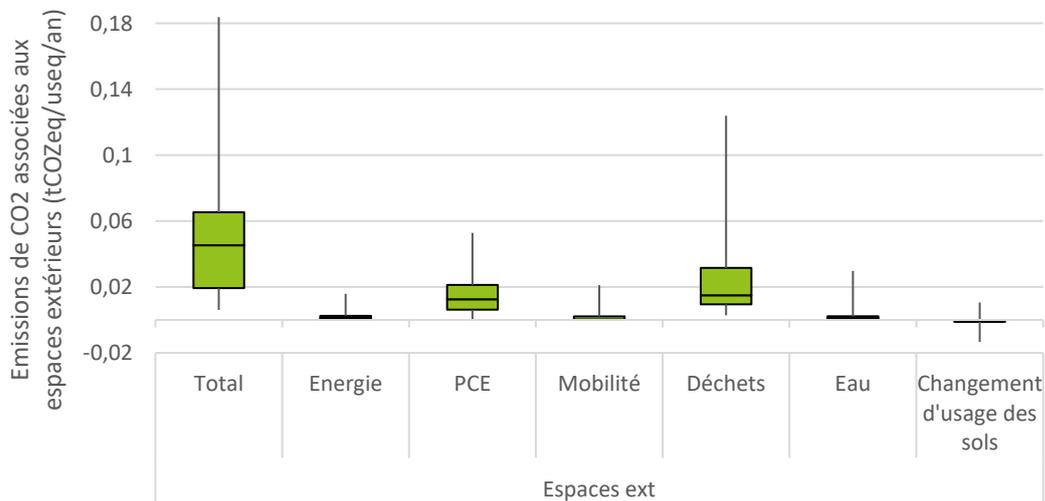


Figure 10 : Répartition des émissions liées aux espaces extérieurs par contributeur, en tonnes de CO<sub>2</sub> par usager équivalent par an

## 3. Influence du contexte géographique

---

Les impacts environnementaux obtenus avec la méthode QEC dépendent de la localisation des quartiers pour deux raisons :

- Les disparités climatiques ;
- Les disparités territoriales (densité/bassins d'emploi).

### 3.1. Influence de la zone climatique

Les conditions climatiques ont un impact sur les besoins de chaud et de froid des bâtiments (cf. **Figure 11** et **Figure 12**) et donc sur le contributeur Énergie.

Les projets de l'échantillon ne couvrent pas l'ensemble des zones climatiques (cf. **Figure 13**), environ  $\frac{3}{4}$  des projets sont localisés dans la zone H1 (zone où les températures hivernales sont les plus froides), environ  $\frac{1}{4}$  des projets sont localisés dans la zone H2 (zone où les hivers sont plus tempérés) et aucun projet est localisé en zone H3<sup>11</sup> (zone sous l'influence du climat méditerranéen).

La **Figure 14** présente les émissions de CO<sub>2</sub> associées au contributeur Énergie par usager équivalent en fonction de la zone climatique (projets de référence uniquement). Ces résultats montrent qu'effectivement les quartiers de référence situés en zone H2 ont tendance à émettre moins d'émissions de CO<sub>2</sub> liées au contributeur Énergie du fait d'une consommation moindre de chauffage et d'Eau Chaude Sanitaire (ECS). La **Figure 15** présente les émissions de CO<sub>2</sub> totales par usager équivalent en fonction de la zone climatique (quartiers de référence uniquement). Ce second graphique montre que sur l'ensemble des contributeurs, la différence d'émissions entre zones H1 et H2 est moindre. Cela est notamment lié au biais de l'échantillon qui contient pour la zone H1 de nombreux quartiers localisés à Paris et sa petite couronne ( $\frac{3}{4}$ ), or ces quartiers jouissent d'un impact carbone lié au contributeur Mobilité plus faible du fait d'un réseau de transport en commun très développé.

---

<sup>11</sup> Des projets situés en zone climatique H3 pourront être ajoutés à l'échantillon dans une prochaine mise à jour de la note

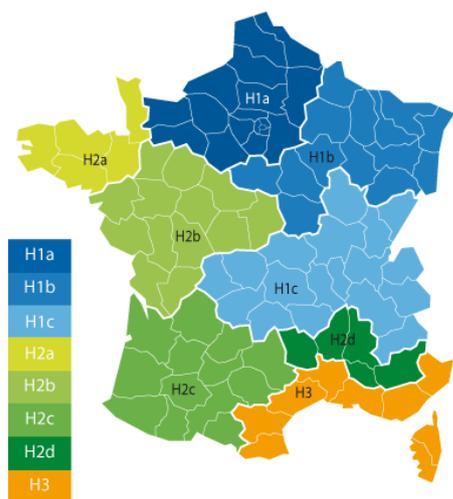


Figure 11 : découpage des zones climatiques

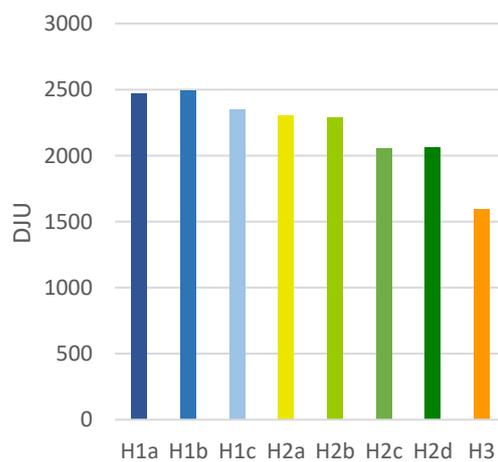


Figure 12 : degrés Jours Unifiés (DJU) en fonction de la zone climatique (RE2020)

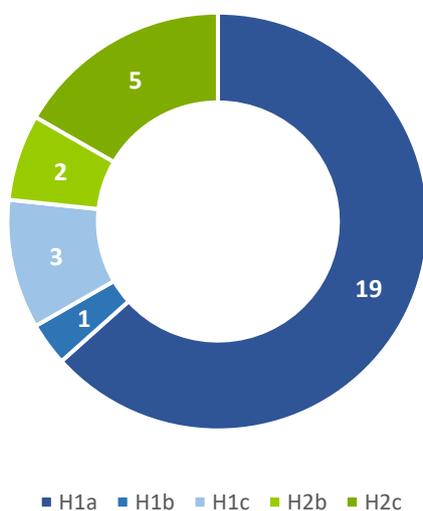


Figure 13 : nombre de projets par zone climatique

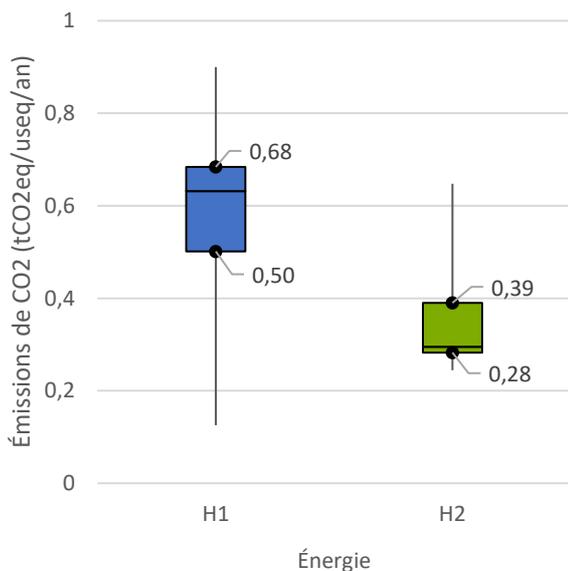


Figure 14 : Émissions de CO2 associées au contributeur Énergie par usager équivalent et par an suivant la zone climatique (H1 ou H2) (projets de référence)

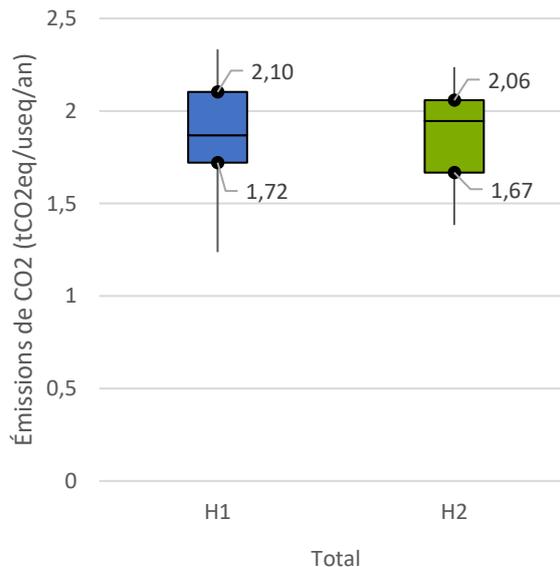


Figure 15 : Émissions de CO2 totales par usager équivalent et par an suivant la zone climatique (H1 ou H2) (projets de référence)

### 3.2. Influence des disparités territoriales

L'INSEE catégorise les communes selon 9 classes d'aire urbaine qui dépendent principalement des bassins d'emploi. La majorité des projets (29 projets sur 30) sont localisés dans la classe des communes des grands pôles d'emploi. Une distinction a été réalisée entre Paris et sa petite couronne (zone 101) et les autres communes de grandes agglomérations (zone 111).

La **Figure 16** présente les émissions de CO<sub>2</sub> totales par usager équivalent et par an suivant la classe d'aire urbaine (projets et projets de référence). Les émissions associées aux projets de référence de Paris et sa petite couronne sont en moyenne plus faibles que celles associées aux projets de communes de grandes agglomérations. Cette différence est encore une fois majoritairement liée au contributeur Mobilité qui émet moins de CO<sub>2</sub> pour la zone 101 du fait du réseau de transport développé de Paris et sa petite couronne (cf. **Figure 17**).

Des projets situés en zone rurale pourront être ajoutés à l'échantillon dans une prochaine mise à jour de la note de manière à compléter cette étude de l'influence des disparités territoriales.

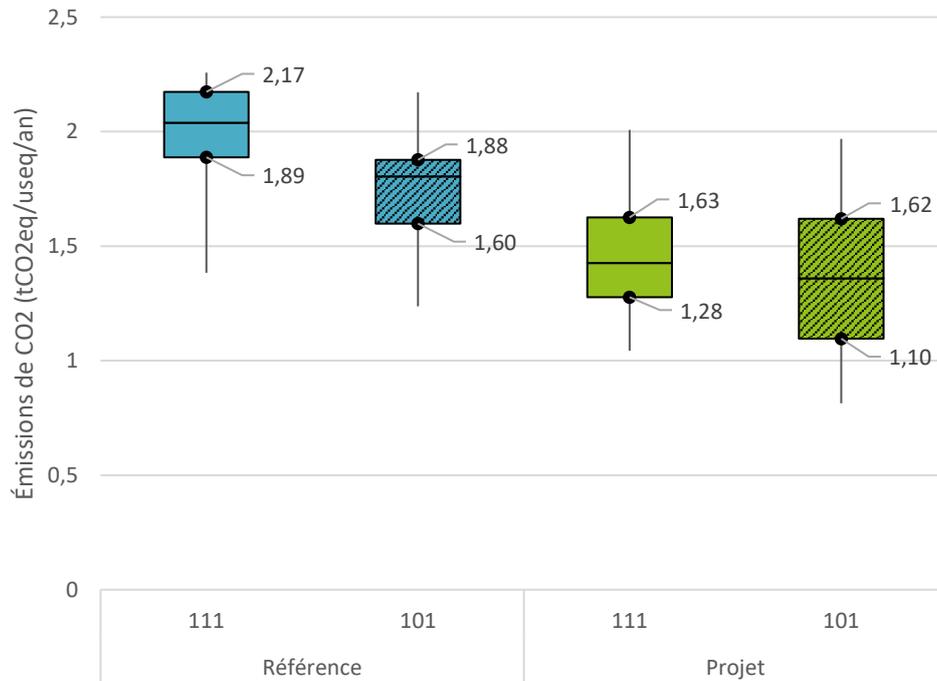


Figure 16 : Émissions de CO2 totale par usager équivalent et par an suivant la classe d'aire urbaine (projets et projets de référence)

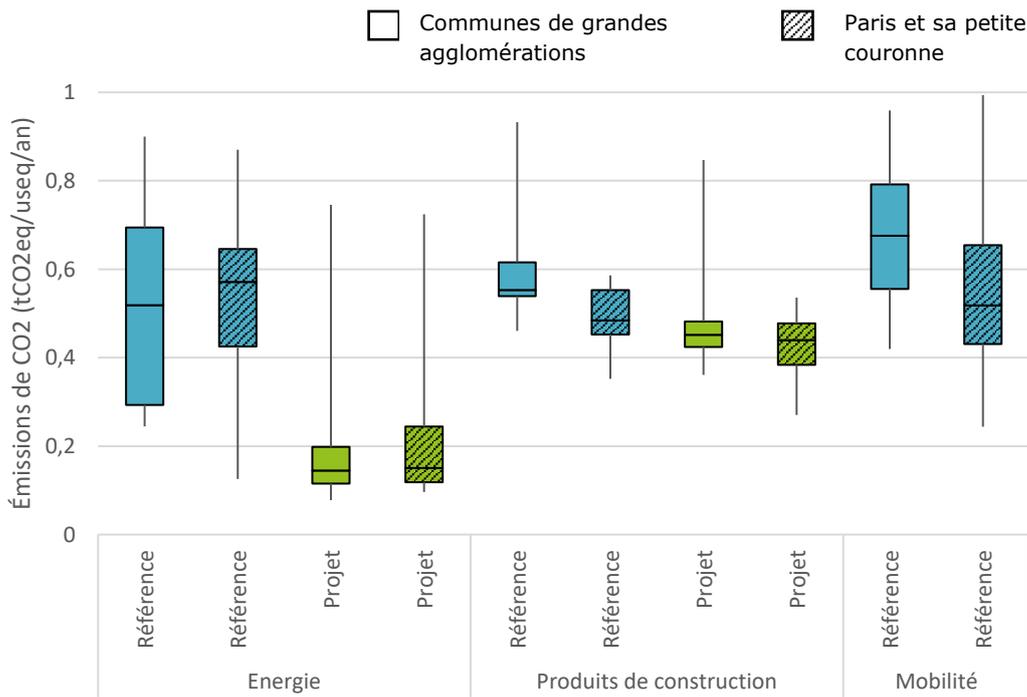


Figure 17 : Émissions de CO2 associées au contributeurs Énergie, Produits de construction et Mobilité par usager équivalent et par an suivant la classe d'aire urbaine (projets et projets de référence)

## 4. Influence de la programmation (collectivité)

Dans cette section l'influence sur les émissions de CO<sub>2</sub> de l'usage des bâtiments du quartier (tertiaire, résidentiel ou mixte) ainsi que celle de l'imperméabilisation des sols et de la compacité du quartier ont été étudiées.

### 4.1. Usage des bâtiments

Les quartiers ont été classés en trois catégories (dominante tertiaire, mixte et dominante résidentiel) en fonction de l'usage des bâtiments (cf. **Tableau 1**). La **Figure 18** présente les émissions de CO<sub>2</sub> totales (ensemble des contributeurs). Ces dernières ont tendance à augmenter avec la part de surface utile de bâtiments résidentiels, cela est dû à une consommation énergétique plus élevée des bâtiments résidentiels et à fortiori des émissions de CO<sub>2</sub> associées plus importante par rapport aux autres catégories de bâtiments.

Tableau 1 : Catégories en fonction de la part de surface utile de bâtiments résidentiels

Part de surface utile de bâtiments résidentiels	Catégorie d'usage
0 % - 25 %	Dominante tertiaire
25 % - 75 %	Mixte
75 % - 100 %	Dominante résidentiel

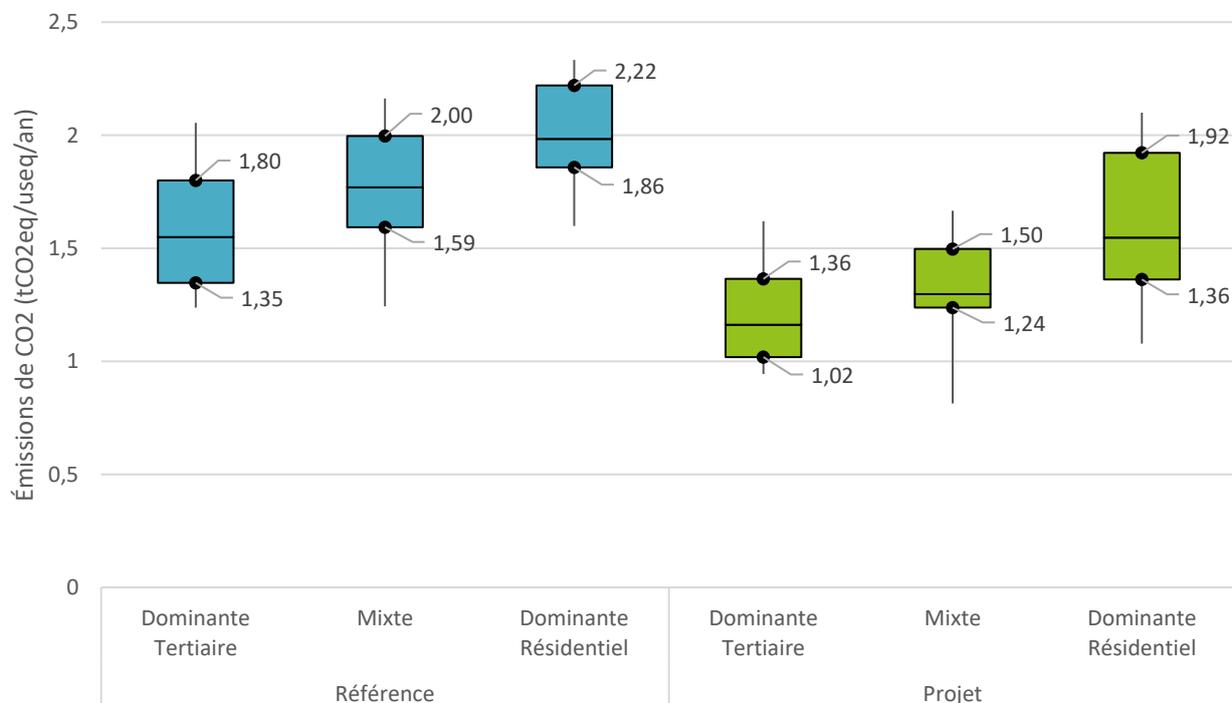


Figure 18 : Émissions de CO<sub>2</sub> par usager équivalent et par an suivant la catégorie d'usage du quartier (dominante tertiaire, mixte et dominante résidentiel)

## 4.2. Imperméabilisation des sols

La méthode QEC prend en compte les flux de carbone liés aux changements d'usage des sols. L'évaluation est basée sur la méthode de l'outil ALDO<sup>12</sup> mis à disposition par l'ADEME.

Une des principales stratégies pour les espaces extérieurs est de désimperméabiliser les sols. Ainsi, les projets de l'échantillon ont été classés suivant trois stratégies :

- La surface imperméabilisée sur l'ensemble du périmètre (bâtiments + espaces extérieurs) avant-projet est supérieure à celle après projet (stratégie de désimperméabilisation) ;
- La surface imperméabilisée sur l'ensemble du périmètre reste inchangée (pas d'action) ;
- La surface imperméabilisée sur l'ensemble du périmètre avant-projet est inférieure à celle après projet (stratégie d'imperméabilisation) ;

Sur la **Figure 19**, nous pouvons voir les émissions carbonées totales des espaces extérieurs suivant la stratégie appliquée. Lorsque la part d'imperméabilisation du quartier n'évolue pas (colonne « pas d'action » de la **Figure 19**), c'est généralement qu'il y a eu peu d'actions sur les espaces extérieurs existants, les émissions de CO<sub>2</sub> associées sont alors plus faibles.

La stratégie de désimperméabilisation a tendance à être moins impactante que celle d'imperméabilisation, cela est notamment lié aux émissions associées aux matériaux de constructions et aux changements d'affectation des sols globalement moins élevées dans le cas des stratégies de désimperméabilisation (cf. **Figure 20** et **Figure 21**).

La **Figure 21** présente les émissions de carbonées par usager équivalent liées aux changements d'usage des sols pour les stratégies d'imperméabilisation et de désimperméabilisation. Des impacts négatifs indiquent que le changement d'usage des sols permet de stocker du carbone et à l'inverse, des impacts positifs indiquent que le changement d'usage des sols est à l'origine d'un déstockage de carbone. D'après la **Figure 21**, les stratégies de désimperméabilisation permettent globalement de stocker davantage de carbone en comparaison avec les stratégies d'imperméabilisation. Cependant le graphique montre qu'une partie des projets ayant une surface imperméabilisée avant-projet plus faible qu'après projet présente un impact lié au changement des sols négatif. En effet, dans certains cas l'usage des sols avant-projet est dédié à l'exploitation agricole permettant de stocker moins de carbone que les surfaces végétalisées mises en place dans le cadre des projets. De plus certains projets, même s'ils impliquent une augmentation de la surface imperméabilisée à l'échelle du périmètre, intègrent par exemple en parallèle la mise en place de zones humides permettant de compenser le carbone déstocké par l'imperméabilisation.

---

<sup>12</sup> ADEME, « Outil ALDO ». <https://www.territoires-climat.ademe.fr/ressource/638-76>

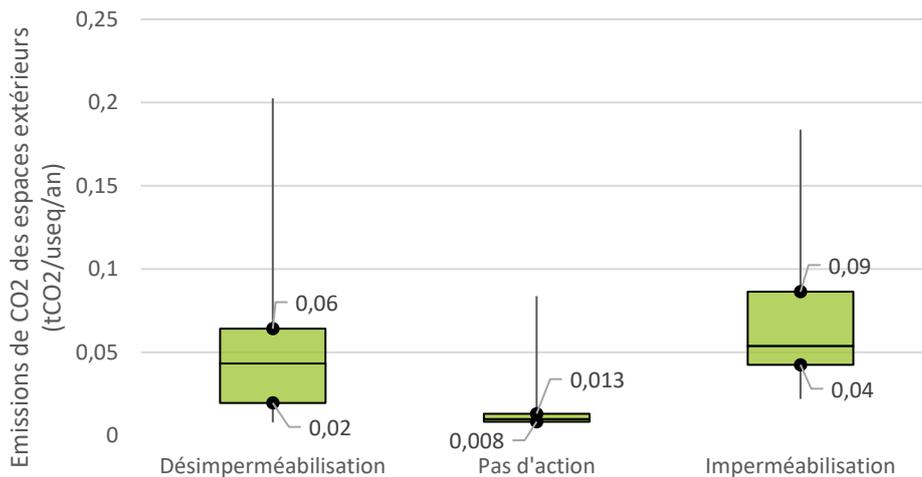


Figure 19 : Emissions des espaces extérieurs en tonnes de CO2 par usager équivalent en fonction de la stratégie d'usage des sols

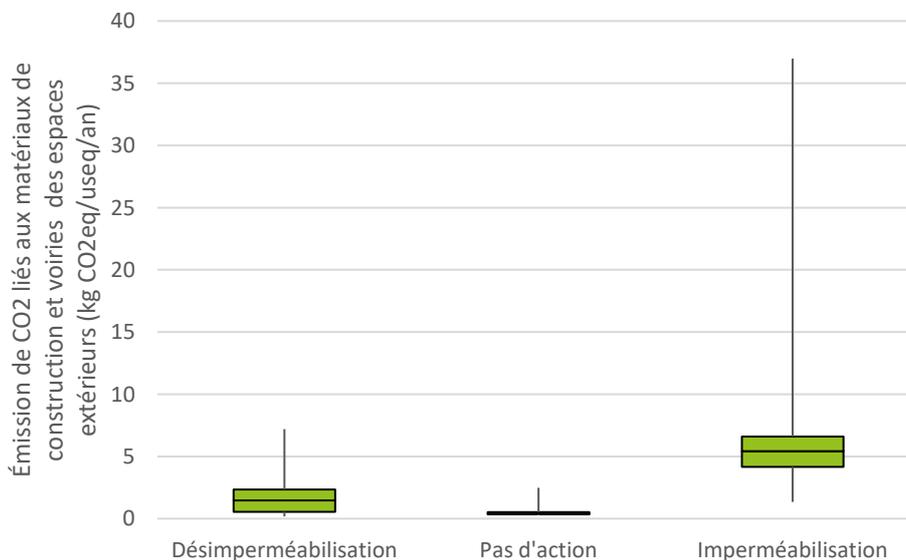


Figure 20 : Émissions de CO2 liées aux matériaux de construction et voiries des espaces extérieurs par usager équivalent en fonction de la stratégie d'usage des sols

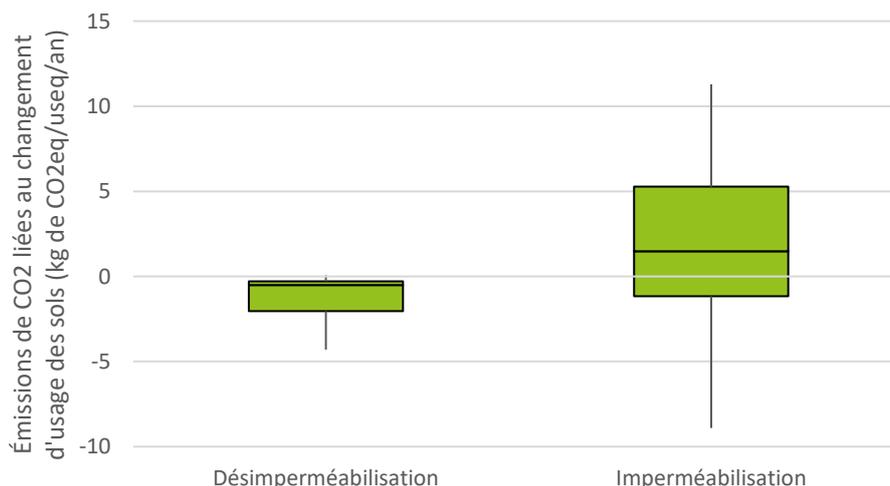


Figure 21 : Émissions de CO2 liées aux changements d'usage des sols par usager équivalent en fonction de la stratégie d'usage des sols

### 4.3. Compacité du quartier

Il existe plusieurs indicateurs pour analyser la compacité d'un quartier. Le **coefficient d'occupation des sols (COS)** est calculé en divisant la surface de plancher totale du quartier (m<sup>2</sup>) par la surface d'emprise au sol des bâtiments (m<sup>2</sup>). Ainsi ce coefficient de densité du quartier n'intègre pas la surface des espaces extérieurs.

Il a été choisi de ne pas utiliser le coefficient d'emprise au sol (CES), qui correspond au rapport de la surface d'emprise au sol des bâtiments par la surface totale du périmètre. Cet indicateur classe la densité d'un quartier en prenant en compte la surface d'espace extérieurs, ce qui est cohérent pour des critères qualitatifs, mais ne permet pas de rendre compte de l'ampleur des constructions d'un quartier. De plus comme cela a été vu dans le chapitre sur l'Imperméabilisation des sols, la part des espaces extérieurs est moindre dans les émissions totales d'un quartier.

Sur la **Figure 22**, il ne semble pas y avoir de conclusion évidente à apporter sur l'évolution des impacts carbone d'un quartier suivant l'indicateur de compacité.

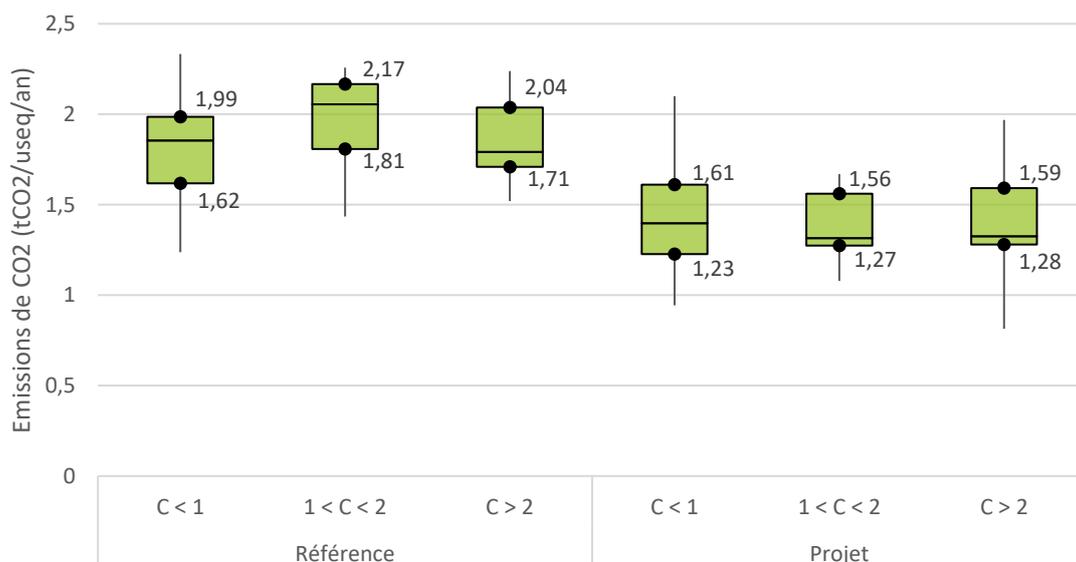


Figure 22 : Répartition des impacts totaux des quartiers d'aménagement en fonction de leurs coefficients d'occupation des sols (COS)

## 5. Influence de la stratégie de mise en œuvre (aménageur)

### 5.1. Les leviers d'action

L'outil d'aide à la décision « Shapley », mesurant l'atteinte du potentiel présenté en **Figure 2**, permet d'identifier avec UrbanPrint les leviers qui ont permis d'améliorer le projet par rapport à la référence, ainsi que les leviers permettant d'améliorer au mieux le projet. Ainsi, sur **la Figure 23** est présentée la répartition en pourcentage des leviers déjà mobilisés dans les projets étudiés, ainsi que celle des leviers qui permettraient d'améliorer le projet.

Les contributeurs ayant le plus de marge de manœuvre sur les émissions totales d'un quartier sont donc ceux de l'énergie et des matériaux de construction. Comme nous l'avons vu précédemment, ils font aussi partie des contributeurs ayant le plus d'impact dans les émissions totales d'un quartier. Ainsi il n'est pas étonnant qu'actionner des leviers pour réduire les émissions de ces contributeurs aura plus de poids que pour les autres contributeurs.

Nous voyons ainsi sur **la Figure 23** que les leviers concernant le contributeur énergie constituent à eux seuls 58% des gains potentiels et qu'en moyenne les opérations activent 2/3 de ces leviers.

Il est notable que 7% du poids carbone des leviers permettant d'améliorer les projets est attribué au traitement des déchets organiques par compostage de quartier ou plateforme de compostage.

## Répartition des émissions de carbone des projets d'aménagement

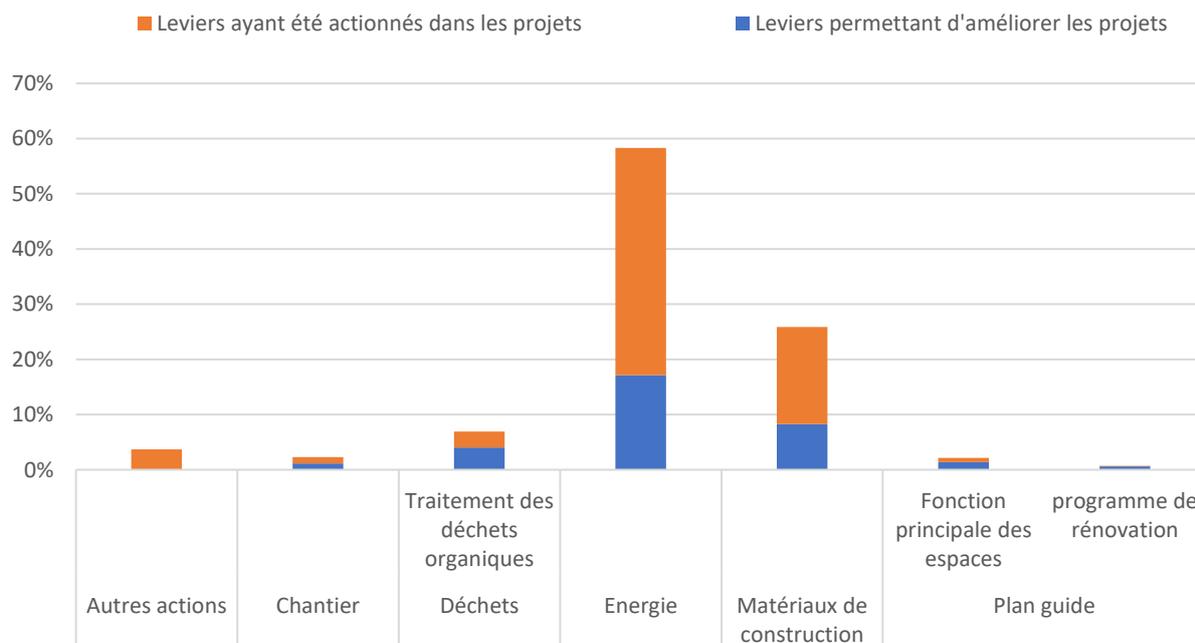


Figure 23 : Répartition en pourcentage du poids carbone des leviers actionnés dans les projets, et des leviers permettant d'améliorer les projets, par contributeur.

La **Figure 24** et la **Figure 25** permettent de voir en détail la part des leviers des contributeurs Energie et Matériaux de construction (ou PCE).

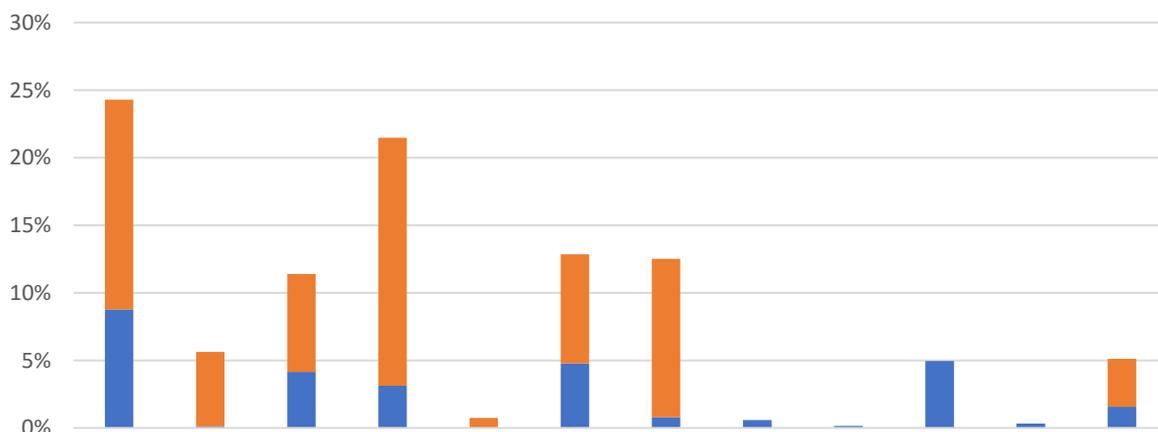


Figure 24 : Répartition en pourcentage du poids carbone des leviers pour le contributeur Energie

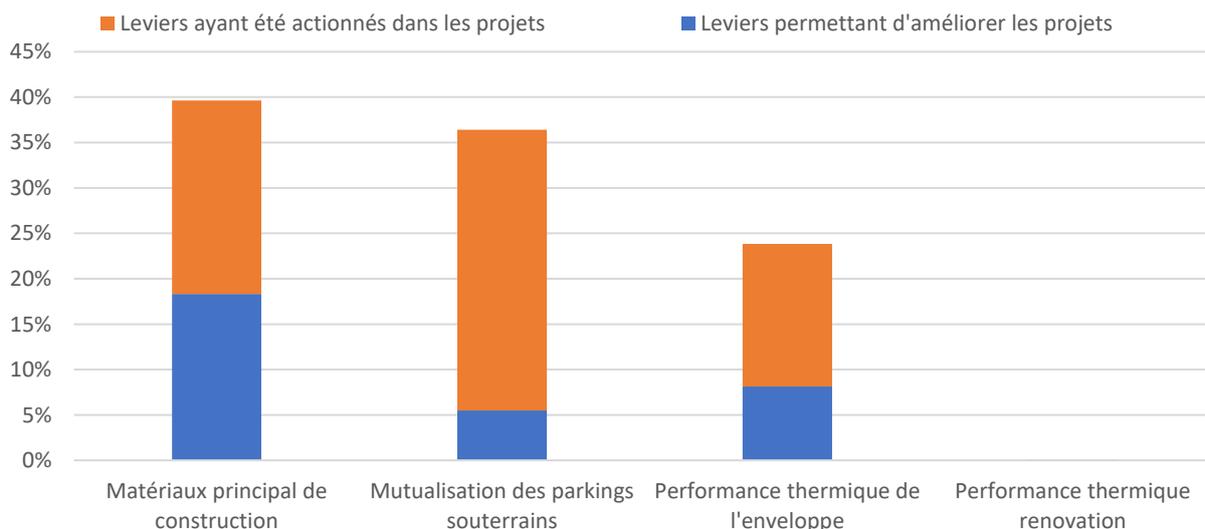


Figure 25 : Répartition en pourcentage du poids carbone des leviers pour le contributeur Matériaux de construction (ou PCE)

Le levier de performance thermique de la rénovation a une part assez faible car seul un projet de l'échantillon a pour programme uniquement de la rénovation. Sur un échantillon de projets de rénovation uniquement, nous pouvons supposer que la part du poids de ce levier serait équivalente au levier de performance thermique de l'enveloppe des projets neufs, ou plus importante car les matériaux de construction auraient moins d'impact dans un projet de rénovation.

## 5.2. Matériaux biosourcés

Afin de tester le poids de l'utilisation de matériaux biosourcés dans les projets d'aménagements, nous avons présenté les émissions de CO<sub>2</sub> (tCO<sub>2</sub>/useq/an) en classant les projets selon leurs taux de matériaux biosourcés.

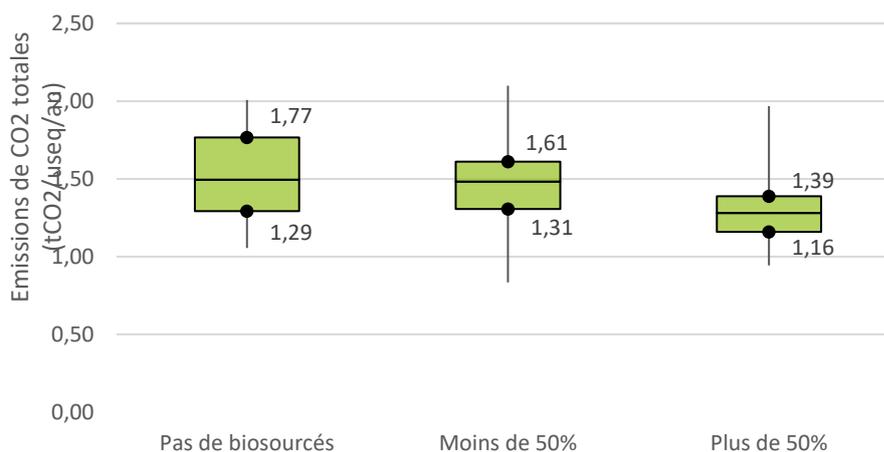


Figure 26 : Emissions totales en tonnes de CO<sub>2</sub> par usager équivalent par an, en fonction de la part d'utilisation de matériaux biosourcés

Sur la **Figure 26**, il semble que les projets d'aménagement utilisant plus de matériaux biosourcés émettent moins en CO<sub>2</sub>. Or, en se concentrant sur le contributeur des produits de constructions à la **Figure 27**, il est notable que la réduction d'émissions de CO<sub>2</sub> due à l'utilisation de matériaux biosourcés est présente, mais assez faible par rapport aux réductions d'émissions

présentées en **Figure 26**. Cela peut être dû au fait que les projets utilisant plus de matériaux biosourcés sont des projets ambitieux sur d'autres leviers d'action également.

Aussi, la **Figure 25** montre que le type de matériaux de construction représente 40% des leviers permettant de réduire l'empreinte carbone du contributeur PCE, d'où la diminution assez faible notée en **Figure 27**.

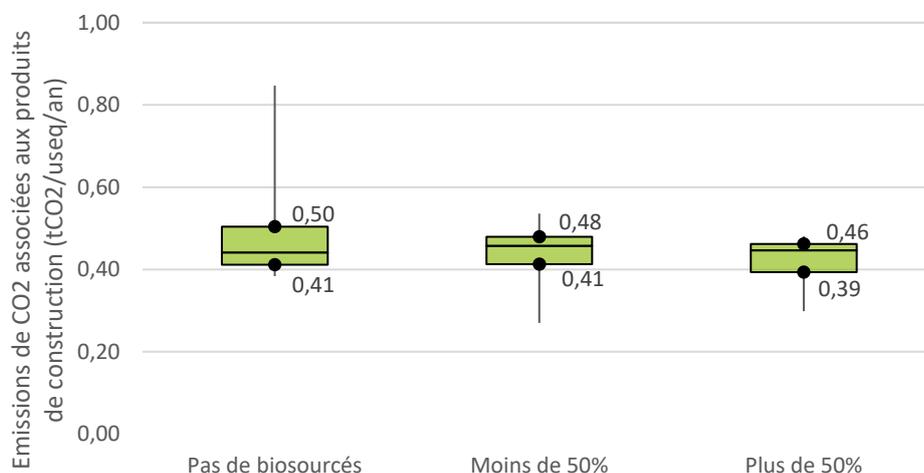


Figure 27 : Emissions du contributeur « produits de construction » en tonnes de CO<sub>2</sub> par usager équivalent par an, en fonction de la part d'utilisation de matériaux biosourcés

## Conclusion

La méthode quartier énergie carbone a été appliquée à un échantillon de 30 projets d'aménagement opérationnel de manière à étudier la répartition des émissions de CO<sub>2</sub> équivalent à cette échelle. Les 30 projets de l'échantillon étant ambitieux, les résultats des projets de référence (même localisation, même programme et même forme urbaine mais avec des niveaux de performance dits "business as usual") ont également été ajoutés à l'étude. Les résultats de l'étude ont été ramenés à l'usager équivalent (useq) du quartier puisqu'il s'agit de l'unique variable commune à tous les contributeurs du quartier (énergie en phase d'exploitation, produits de construction, gestion de l'eau et des déchets, mobilité quotidienne, chantier et usage des sols).

Une première analyse globale a permis de montrer qu'au total (tous contributeurs confondus), les émissions de CO<sub>2</sub> sont :

- Comprises entre 0,8 et 2,1 tCO<sub>2</sub>eq/useq/an avec une médiane située autour de 1,4 tCO<sub>2</sub>eq/useq/an pour les projets de l'échantillon ;
- Comprises entre 1,2 et 2,4 tCO<sub>2</sub>eq/useq/an avec une médiane située autour de 1,9 tCO<sub>2</sub>eq/useq/an pour les projets de référence associés aux projets de l'échantillon.

Les trois principaux contributeurs à l'échelle des projets d'aménagement sont généralement l'Énergie, les Produits de construction et la Mobilité. Cependant, la hiérarchisation de ces trois contributeurs varie d'un projet à l'autre et pour les projets ayant diminué drastiquement leur impact en énergie, le contributeur Déchets devient le 3<sup>ème</sup> plus gros contributeur. L'étude a également permis de comparer, pour les projets hors référence, le poids des contributeurs liés aux bâtiments (situé entre 0,8 et 2 tonnes de CO<sub>2</sub>eq/useq/an) à celui des contributeurs liés aux espaces extérieurs (situé entre 0 et 0,2 tonnes de CO<sub>2</sub>eq/useq/an).

Ensuite, les paramètres influençant les émissions des projets d'aménagement ont été classés en trois catégories : les paramètres dépendant du contexte géographique (ex : zone climatique, disparités territoriales), les paramètres dépendant de la programmation (ex : usage des bâtiments, compacité), les paramètres dépendant de la stratégie de mise en œuvre (ex : choix des matériaux, choix des systèmes énergétiques, etc.). Pour les espaces extérieurs, les Produits de construction et les Déchets sont les contributeurs les plus impactants. Les résultats en termes d'impact carbone par usager équivalent ont été étudiés en fonction de chacun de ces paramètres.

Concernant l'influence du contexte géographique, il a été montré que la localisation impacte fortement le contributeur Mobilité (accessibilité aux réseaux de transport en commun) et le contributeur Énergie (besoins de chauffage différents en fonction de la zone climatique).

Trois facteurs dépendant de la programmation ont été étudiés : l'usage des bâtiments, l'imperméabilisation des sols et la compacité du projet. Concernant l'usage des bâtiments, il a été montré que les émissions de CO<sub>2</sub> sont plus importantes pour des projets comportant plus de bâtiments résidentiels. En effet, ces derniers sont associés à des consommations énergétiques plus importantes que les bâtiments tertiaires. L'étude de l'influence de l'imperméabilisation des sols montre que les projets présentant une augmentation de la surface imperméabilisée ont globalement des émissions de CO<sub>2</sub> associées aux espaces extérieurs (notamment sur les contributeurs Produits de construction et changement d'usage des sols) plus importantes que les projets menant une stratégie de désimperméabilisation des sols. Cependant, certains projets qui impliquent une augmentation de la surface imperméabilisée compensent le déstockage carbone associé avec la mise en place par exemple de zones humides. Enfin, sur l'échantillon étudié, il a semblé difficile d'établir des conclusions concernant l'influence sur les émissions de CO<sub>2</sub> de la compacité.

Enfin l'indicateur "atteinte du potentiel" a permis d'identifier pour chaque projet les leviers d'action déjà mobilisés ou à mobiliser pour atteindre l'optimum en termes de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Les contributeurs Énergie et Produits de construction présentent le potentiel de réduction des émissions le plus important, cela est logique au vu des poids relatifs à ces deux contributeurs. Le contributeur Déchets arrive en troisième position.

L'échantillon étudié pourra être enrichi au fil des nouvelles modélisations avec le logiciel UrbanPrint. En effet, l'échantillon actuel ne couvre pas l'ensemble du territoire (peu de projets ruraux, pas de projets en zone climatique H3) ni toutes les typologies de projet (un seul projet uniquement de rénovation). Enfin, les tests réalisés avec UrbanPrint depuis deux ans ont permis d'intégrer un nombre important de leviers liés à l'aménagement. Néanmoins, des leviers très spécifiques ou faisant appel à des technologies innovantes ne sont pas forcément encore disponibles dans le logiciel et n'apparaissent donc pas dans le calcul de l'atteinte du potentiel. Des travaux sont cependant menés continuellement de manière à continuer l'intégration d'un maximum de leviers pertinents.

## Annexe 1 : liste des projets de l'échantillon

Projet	Localisation
<b>Lotissement le Schwemmloch</b>	La Wantzenau
<b>Nc</b>	Nc
<b>17&amp;Co</b>	Paris
<b>Zac Eoles – Écoquartier Rouget-de-Lisle</b>	Poissy
<b>ZAC des Rives de la Haute-Deûle</b>	Lille   Lomme
<b>Écoquartier des Docks de Saint-Ouen-sur-Seine</b>	Saint-Ouen-sur-Seine
<b>Écoquartier de l'Arsenal</b>	Rueil-Malmaison
<b>Nc</b>	Nc
<b>ZAC Saint-Vincent-de-Paul</b>	Paris
<b>Gare de Lyon Daumesnil</b>	Paris
<b>Nc</b>	Nc
<b>Nc</b>	Nc
<b>Cité Descartes</b>	Champs-sur-Marne
<b>Projet Hébert</b>	Paris
<b>Nc</b>	Nc
<b>Issy Cœur de Ville</b>	Issy-les-Moulineaux
<b>Village Olympique et Paralympique</b>	Saint-Denis   Saint-Ouen-sur-Seine   Ile-Saint-Denis
<b>Quartier de la gare de Saint-Julien</b>	Saint-Julien-en-Genevois

Nc : Non communiqué

## Annexe 2 : projet de référence

---

Le projet de référence est défini avec les critères suivants :

- Matériaux de construction :
  - Mixte pour les maisons individuelles dont la construction a lieu après 2025
  - Classique (béton, acier) sinon
- Performance énergétique visée selon la réglementation en vigueur fonction de la date du permis de construire du bâtiment (cf. valeurs par défaut des enveloppes (U, ratio de surface vitrée...) de la méthode Quartier Energie Carbone) :
  - Neuf RT2012 – niveau standard
  - Neuf RE2020 – niveau d'isolation élevé (équivalent isolation label E1-E2 label E+C-)
  - Rénovation : RT existant 2017
- Traitement des boues de potabilisation : épandage
- Traitement des eaux usées : station d'épuration centralisée
- Collecte et traitement des déchets : porte à porte, tri des emballages et papiers, pas de collecte spécifique des déchets organiques
- Gestion des terres de terrassement : export vers un site de stockage par voie routière (distances identiques au projet)
- Stratégie d'éclairage des espaces extérieurs : avec arrêt partiel la nuit, performance et densité standard des points lumineux.
- Usages des sols des espaces extérieurs (hors emprise au sol bâtiment donc) après travaux : parc mixte (50% des surfaces végétalisées (espace vert artificiel), 50% des surfaces imperméabilisées).
- Contexte : le contexte imposé par le programme/plan-masse est repris tel quel par le quartier de référence. Ainsi, outre la localisation géographique, les distances aux centres de traitement des déchets ou des gravats sont les mêmes que celle du quartier projet ainsi que la quantité de déblais et remblais renseignée dans le projet qui dépend du programme et non de la stratégie de mise en œuvre.
- **Systèmes de production énergétique bâtiment** selon la réglementation en vigueur fonction de la date du permis de construire du bâtiment :
  - Neuf RT2012 (avant 2022) ou rénovation :
    - Chauffage : chaudière gaz condensation individuelle (maison) ou collective
    - Refroidissement : aucun dans le résidentiel, PAC dans le tertiaire
    - Eau Chaude Sanitaire : chaudière gaz individuelle (maison) ou collective
  - Neuf RE2020 (seuils 2022) :
    - Chauffage : PAC électrique pour maison et chaudière gaz condensation pour logements collectifs
    - Refroidissements : aucun dans le résidentiel, PAC dans le tertiaire
    - Eau Chaude Sanitaire : Ballons thermodynamiques ou PAC collective ou double service
  - Neuf RE2020 (seuils 2025) :
    - Chauffage : PAC électrique pour tous les usages résidentiels
    - Refroidissements : aucun dans le résidentiel, PAC dans le tertiaire
    - Eau Chaude Sanitaire : Ballons thermodynamiques ou PAC collective ou double service

- Ventilation : simple flux dans le résidentiel, double flux dans le tertiaire.
- Ventilation des parkings souterrains : non régulés dans le résidentiel, régulés dans le tertiaire
- Eclairage : standard (sans détection de présence)
- Eclairage des parkings souterrains : Standard par défaut (pas de détection de présence).
- Production solaire : aucune
- Pas de système de récupération d'eau de pluie

## Annexe 3 : L'utilisateur équivalent

Aménager un quartier, c'est mettre à disposition des mètres carrés pour des personnes. Le quartier rend service à ses usagers, ainsi normaliser les résultats des émissions carbone générées par le quartier par les usagers plutôt que par la surface semble évident.

En revanche, on comprend bien que les impacts attribuables à un visiteur qui ne fait que passer par l'espace public ne seront pas aussi importants que ceux d'un travailleur qui passe sa journée sur le site ou d'un habitant, qui y passe l'essentiel de son temps. Le cas des visiteurs étant plus complexe, cette première version désignera comme usagers les habitants et les employés en omettant les visiteurs, élèves, patients, etc.

Cependant, diviser les émissions directement par la somme des habitants et des employés entraîne un déséquilibre dans les résultats car ces usagers ne disposent pas de la même surface utile moyenne et que les émissions PCE/énergie diffèrent selon les usages. Ainsi pour deux quartiers aux mixités programmatiques différentes, les résultats normalisés à l'utilisateur (habitant + employé) ne reflèteraient pas les efforts fournis. *Exemple : un logement collectif devrait émettre en 2025 environ 1026 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> (sur 50 ans, 376 pour l'énergie et 650 pour la construction), selon les seuils non modulés de la RE2020 auxquels on ajoute l'impact de l'électricité des usages non réglementés. Cela représenterait 693 kgCO<sub>2</sub>e/habitant/an, en considérant 33,75 m<sup>2</sup>/habitant. En appliquant le même raisonnement à un employé de bureau, cela représenterait des émissions carbonées à hauteur de 573 kgCO<sub>2</sub>e/employé/an, soit 17% de moins qu'un habitant. Avec cette logique, un quartier 100% bureau sera forcément meilleur qu'un quartier de logement avec des efforts à priori identiques.*

Il faut donc définir un usager équivalent pour additionner habitants et employés et lisser les écarts de performance intrinsèques aux différents programmes. L'utilisateur le plus courant dans les opérations visées par le re d'employés en habitants équivalents.

C'est une méthode similaire à celle qui est parfois employée pour faciliter la communication dans le cadre du dimensionnement ou du suivi de certains systèmes techniques tels que :

- [les stations d'épuration](#), l'équivalent-habitant y étant calibré sur la charge organique biodégradable
- [les réseaux de chaleurs](#), les équivalents logements y étant calibrés sur la livraison de chaleur

### Analogie avec une métrique d'équivalence connue : le PRG<sub>100</sub> ou CO<sub>2</sub> équivalent

*(Texte très flou et difficilement lisible, probablement une image de qualité médiocre ou un scan erroné. Le contenu semble être une introduction à une analogie avec le PRG<sub>100</sub> ou CO<sub>2</sub> équivalent, mais les détails sont indéchiffrables.)*

Pour définir le coefficient de conversion permettant d'assimiler l'utilisateur d'un bâtiment à un habitant de logement collectif, on utilisera l'impact en ACV matériaux/énergie des surfaces de bâtiments qui lui sont reliées. Les surfaces moyennes consacrées à un usager au sein d'un bâtiment sont issues de bases de données publiques nationales<sup>8</sup>. L'impact des surfaces construites utilisé dans cette première version est la somme de  $I_{c\_construction,max,moyen}$  et de  $I_{c\_énergie,max,moyen}$  de la RE2025<sup>9</sup> à laquelle on ajoute l'impact carbone de l'électricité spécifique. Ces valeurs constituent souvent la majorité des impacts sur le périmètre de l'aménagement, et correspondent dans une certaine mesure aux émissions verrouillées par la mise à disposition de surfaces construites pour des usages identifiés. Elles sont réglementées et bénéficient donc de valeurs repères, et sont plutôt stables d'un projet à l'autre (contrairement à la mobilité qui varie beaucoup selon les contextes).

# Répartition des émissions de carbone des projets d'aménagement

