

Étude-test portant sur l'analyse de l'impact environnemental des modes d'habitat à Genève avec études de cas

Rapport final – version 2 avec nouvelles données de mobilité



sofies
leading sustainability

 ecometrics



État de Genève

Département du territoire (DT)

Secrétariat général / Office cantonal de l'environnement / Service cantonal du développement durable
/ Office cantonal des transports / Office de l'urbanisme / Office cantonal de l'énergie

Décembre 2021

Document réalisé par :

Sofies SA

Quai du Seujet 28 - CP 2091

1211 Genève 1

Suisse

+41 22 338 15 24

www.sofiesgroup.com

Ecometrics

2 rue Faller

1202 Genève

Suisse

+41 78 611 40 64

www.ecometrics.ch

6-t bureau de recherche

Rue des Voisins 15

1205 Genève

Suisse

+41 22 552 02 98

www.6-t.co

Table des matières

1	Résumé	6
1.1	Contexte et objectifs	6
1.2	Méthodologie	6
1.3	Résultats et analyse	8
1.4	Conclusions et perspectives	10
2	Introduction	11
2.1	Contexte	11
2.2	Objectifs du rapport	11
3	Méthodologie	12
3.1	Les modes d'habitat	12
3.2	Analyse environnementale basée sur l'Analyse de Cycle de Vie	13
3.3	Des données du microrecensement à un modèle statistique pour évaluer l'impact environnemental de la mobilité	14
4	Les modes d'habitat	15
4.1	Description et cartographie	16
4.2	Le logement : caractéristiques déterminantes	18
4.3	La mobilité : caractéristiques déterminantes	22
5	Analyse environnementale basée sur l'Analyse de Cycle de Vie	30
5.1	Analyse des contributions du logement et de la mobilité	30
5.2	Comparaison de l'impact environnemental des modes d'habitat	32
6	Limites de l'étude	37
6.1	Le logement	37
6.2	La mobilité	38
7	Conclusion et perspectives	39
7.1	Perspectives	39
8	Références	41

9	<u>Annexe 1 - tableau de résultats détaillés pour les seize modes d'habitat</u>	43
10	<u>Annexe 2. Modélisation du logement</u>	44
10.1	Les impacts environnementaux du logement : état des connaissances	44
10.2	Dix modes d'habitat basés sur les sous-secteurs statistiques	46
10.3	Méthode d'évaluation des émissions des matériaux	48
10.4	Discussion sur les données de surface habitée de nombre d'habitants par bâtiment	51
11	<u>Annexe 3. Modélisation de la mobilité</u>	53
11.1	Impact selon les facteurs territoriaux – Analyses bivariées	53
11.2	Modèle d'évaluation de l'impact environnemental	55
11.3	Base mobitool des coefficients d'émission par mode	57
11.4	Détail des motifs inclus dans les catégories MRMT	58
11.5	Sources des données	59
12	<u>Annexe 4. Hypothèses de travail</u>	60
13	<u>Annexe 5. Compte-rendu de la revue critique du rapport effectuée par la HEG.</u>	62

Liste des figures

Figure 1. Comparaison des modes d'habitat (mobilité selon motif de dépl.) (en kg de CO ₂ -équ. / pers / an).	8
Figure 2. Comparaison des modes d'habitat (mobilité selon mode de dépl.) (en kg de CO ₂ -équ. / pers / an).	8
Figure 3. Localisation des périmètres utilisés pour illustrer les modes d'habitat.	17
Figure 4. Aperçu des différents chauffages à distance (existants ou planifiés) et source d'énergie (SIG)	21
Figure 5. Représentation de la qualité de desserte en transports publics dans le Grand Genève	23
Figure 6. Représentation de l'indice d'accessibilité gravitaire en transport en commun dans le Grand Genève	24
Figure 7. Extraits du Règlement relatif aux places de stationnement sur fonds privés (L 5 05.10)	25
Figure 8. Impact environnemental de la mobilité à Genève en fonction du revenu par mode de déplacement (à gauche) et par motif (à droite)	26
Figure 9. Estimation de l'impact CO ₂ journalier moyen en fonction de l'effet net du niveau de qualité de desserte TC du lieu de résidence, selon les modes et les motifs agrégés	27
Figure 10. Estimation de l'impact journalier moyen en fonction de l'effet net de l'accessibilité TC du lieu de résidence, selon les modes et les motifs agrégés	28
Figure 11. Estimation de l'impact journalier moyen en fonction de l'effet net de la densité humaine du lieu de résidence, selon les modes et les motifs agrégés	28
Figure 12. Estimation de l'impact journalier moyen en fonction de l'effet net du régime de stationnement du lieu de résidence, selon les modes et les motifs agrégés	29
Figure 13. Répartition moyenne des sources d'émissions de GES pour l'ensemble des modes d'habitat (mobilité détaillée par motif à gauche et par mode à droite)	30
Figure 14. Contribution (en %) du logement et de la mobilité (selon motif de déplacement) aux émissions de GES par personne par an.	31
Figure 15. Contribution (en %) du logement et de la mobilité (selon mode de transport) aux émissions de GES par personne par an.	31
Figure 16. Impact des modes d'habitat (mobilité selon motif de dépl.) (en kg de CO ₂ -équ. / pers / an).	32
Figure 17. Impact des modes d'habitat (mobilité selon mode de transport) (en kg de CO ₂ -équ. / pers / an).	32
Figure 18. Émissions annuelles de CO ₂ [kg/pers] estimées par le modèle, selon le mode de déplacement	36
Figure 19. Émissions annuelles de CO ₂ [kg/pers] estimées par le modèle, selon le motif de déplacement	37
Figure 20. Ecopoints par type de bâtiment en Suisse (limite = valeur limites). Source : (Kaenzig et Jolliet, 2006).	44
Figure 21: Schéma conceptuel rendant compte du modèle et de la manière dont les différentes composantes agissent les unes sur les autres	56

Liste des tableaux

Tableau 1. Description des seize modes d'habitat sélectionnés.	7
Tableau 2. Modes et motifs de déplacement issus du MRMT 2015 et considérés dans les analyses	14
Tableau 3. Description des seize modes d'habitat sélectionnés.	16
Tableau 4. Nombre et répartition des bâtiments résidentiels sur le canton de Genève selon la typologie établie par M. Schuler	19
Tableau 5. Émissions journalières pour un résident moyen du canton de Genève, selon les modes de déplacement et selon les motifs de déplacement [kg équ. CO2 par jour]	22
Tableau 6. Contribution respective des différentes sources d'émissions de GES pour l'ensemble des modes d'habitat	30
Tableau 7. Dispersion des valeurs et écart de performance des modes d'habitat pour chaque paramètre d'impact environnemental.	34
Tableau 8. Impact journalier moyen estimé lié à la mobilité selon le modèle, sur la base des caractéristiques socioterritoriales des différents modes d'habitat [kg équ. CO2 par personne pas jour]	35
Tableau 9. Modes d'habitat classés selon leur résultat (en kg de CO2-équivalent par personne par an).	43
Tableau 10. Corrélations bivariées entre le revenu d'équivalence des personnes et les facteurs socioterritoriaux	55
Tableau 11. Codage des variables telles qu'elles ont été utilisées dans l'élaboration du modèle	56
Tableau 12. Coefficients de la régression	57

Glossaire

2RM : deux roues motorisées

ACV : analyse de cycle de vie

ANCOVA : analyse of covariance

ARE : office fédéral du développement territorial

CAD : chauffage à distance

CO2e : CO2-équivalent

GES : gaz à effet de serre

IDC : indice moyen de dépense de chaleur

IPCC : intergovernmental panel on climate change

ISO : organisation internationale de normalisation

KBOB : conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics

MD : mobilité douce

MRMT : micro-recensement mobilité et transport

OFEV : office fédéral de l'environnement

PAC : pompe à chaleur

RPSFP : règlement relatif aux places de stationnement sur fonds privés

SIA : société suisse des ingénieurs et des architectes

TIM : transport individuel motorisé

1 Résumé

1.1 Contexte et objectifs

La structure de l'urbanisation de l'agglomération du Grand Genève se caractérise par un centre-ville particulièrement dense, des couronnes suburbaines et en cours de densification, des villes « périphériques », ainsi qu'un territoire périurbain étendu composé de zones villas et de villages. Ces derniers sont également en mutation par une densification progressive.

La structure de l'urbanisation peut être associée à différents « **modes d'habitat** », qu'il est possible de qualifier, par exemple, en termes de consommation de surface, de ressources pour les constructions ou de consommation énergétique pour le chauffage et la mobilité.

Le Département du territoire souhaite **déterminer l'impact environnemental de ces différents modes d'habitat du Grand Genève**, selon un échantillon sélectionné du territoire genevois complété par des cas d'études situés dans le Grand Genève vaudois ainsi qu'en France voisine. Le Département du territoire a ainsi sollicité Sofies pour un mandat d'étude sur le sujet, réalisé en collaboration avec Ecometrics et 6-t bureau de recherche.

1.2 Méthodologie

Seize modes d'habitat bien distincts ont été sélectionnés afin d'illustrer la diversité des modes d'habitat du canton de Genève et du Grand Genève. La notion de « mode d'habitat » est ici définie de manière restrictive¹, couvrant deux composantes choisies pour leur aspect non-discrétionnaire (c'est-à-dire pas uniquement dépendant d'aspects comportementaux ou de préférences personnelles) : le **logement**, pour lequel sont considérés la consommation d'énergie (chauffage et eau chaude sanitaire) ainsi que les matériaux du bâti, et la **mobilité**, pour laquelle sont considérés l'infrastructure, les véhicules ainsi que la consommation d'énergie.

Chaque mode d'habitat est basé sur un **exemple concret et les données disponibles les plus fines possibles** ont été utilisées pour la modélisation. Compte tenu de la qualité et de la granularité de celles-ci, les résultats présentés doivent être considérés comme une **approximation**. Cette approximation semble cependant suffisante pour comprendre à quel point les modes d'habitat, ainsi que les impacts environnementaux qu'ils induisent, diffèrent entre eux et quelles en sont les causes directes.

Lors d'une première étape de travail, **dix modes d'habitat ont été sélectionnés de manière intuitive** afin de représenter la majorité des modes d'habitat à Genève du bâti existant, au niveau de leurs paramètres (typologie de bâtiments, source d'énergie, distance au bassin d'emploi, etc.). La composante « logement » de ces dix modes d'habitat a été modélisée à partir des données statistiques existantes **à l'échelle de sous-secteurs statistiques**. Ces secteurs sont généralement constitués d'un ensemble plus ou moins homogène de bâtiments, par exemple Eaux-Vives-Vollandes ou Satigny-Village.

Une deuxième étape de travail a permis d'évaluer l'impact de **quartiers récents** ou des quartiers situés à l'extérieur du canton de Genève, là où les données statistiques ne sont pas (encore) disponibles. La composante « logement » de ces **six modes d'habitat supplémentaires a ainsi été évaluée à partir de cas d'étude concrets**, en se basant sur une modélisation plus détaillée des caractéristiques du bâtiment.

Dans la première version du rapport (janvier 2020), l'évaluation de la mobilité était volontairement limitée aux déplacements pendulaires (trajet domicile-travail). Une troisième étape méthodologique a permis d'inclure également les autres motifs, particulièrement importants tels que les loisirs et les achats pour obtenir un **profil le plus complet possible de la mobilité** des habitants du territoire. Avec cette nouvelle approche plus exhaustive, les résultats de la mobilité sont issus d'un modèle statistique développé ad-hoc qui permet de calculer l'impact d'un mode d'habitat en tenant compte de l'effet croisé

¹ Il est à noter que d'autres définitions seraient envisageables. Une définition plus large, serait, par exemple, de considérer le quartier ou la ville comme l'échelle d'analyse pertinente et donc d'inclure également d'autres infrastructures partagées (équipements publics comme les écoles, bureaux et commerces, etc.).

de facteurs tels que l'accessibilité en transport en commun (TC), de la densité humaine ou encore de la politique de stationnement, tout en maîtrisant l'effet du revenu des ménages.

Les modes d'habitat sont évalués à l'aide d'une approche appelée « **Analyse du Cycle de Vie** » (ACV) ou écobilan (Jolliet et al., 2018). L'ACV permet de comptabiliser les multiples impacts environnementaux générés par un mode d'habitat de manière systémique, en considérant tant les impacts liés à la fabrication et la fin de vie du bâti, des routes ou des véhicules que ceux liés à leur utilisation (p.ex. consommation d'énergie pour le chauffage). Les impacts environnementaux sont ainsi tous ramenés à une grandeur comparable, pour un même service rendu : « **Se loger et se déplacer pour une personne durant une année.** »

Il s'agit donc de l'**empreinte environnementale partielle** d'une personne et les impacts sont évalués par personne par an (une personne moyenne durant une année). Typiquement l'impact de la consommation (alimentation, achats...) n'est pas considéré et devrait être ajoutée si l'on voulait appréhender l'empreinte carbone complète d'un individu. Par ailleurs, les résultats sont exprimés uniquement sous l'angle du réchauffement climatique (en CO₂-équivalent par personne par an).

Un aperçu des valeurs considérées pour chacun des modes d'habitat est donné dans le Tableau 1 ci-dessous. La carte de la Figure 1 montre leur localisation.

#	Type de bâti / surface habitée* (m ² /pers)	Mobilité		Energie de chauffage			Exemple sélectionné
		km/j/pers	% TIM	IDC [MJ/m ²]	Quantité (MJ/pers)	Agents énergétiques	Sous-secteur statistique/ commune
A	Immeubles 1920 & 1980 / 38 m ²	27.6	56%	423	16067	40% gaz 36% mazout	Sainte-Clotilde (Ville de Genève)
B	Immeubles 1920 & 1980 / 41 m ²	27.6	56%	449	18252	60% mazout 40% gaz	Eaux-Vives-Vollandes (Ville de Genève)
C	Grandes barres d'immeubles / 34 m ²	32.1	64%	406	14006	50% gaz 50% déchets	Les Avanchets (Vernier)
D	Grandes barres d'immeubles / 34 m ²	32.1	64%	396	13643	50% gaz 50% déchets	Cité-Nouvelle (Onex)
E	Immeubles anciens / 42 m ²	32.1	64%	432	18252	54% gaz 46% mazout	Vieux Carouge (Ville de Carouge)
F	Immeubles récents > 2010 / 30-35 m ²	32.8	70%	200	9400	50% gaz 50% déchets	La Chapelle (Lancy)
G	Petites villas 1950 / 39 m ²	29.1	67%	544	21132	68% gaz 31% mazout	Petit-Bel-Air (Chêne-Bourg)
H	Petits immeubles 1950 & 2000 / 35 m ²	33.3	72%	461	16194	57% gaz 40% mazout	Petit-Senn-Floraire (Chêne-Bourg)
I	Immeubles récents > 2010 - eco / 30-35 m ²	32.1	71%	150	7050	50% gaz 50% déchets	Les Vergers (Meyrin)
J	Village en cours de densification / 36 m ²	32.8	70%	366	13120	47% mazout 45% gaz	Satigny-village (Satigny)
K	Grandes villas / 69 m ²	35.8	74%	437	30136	85% gaz 13% mazout	Ruth-Nant d'Argent (Cologny)
L	Petit village rural / 45 m ²	35.7	74%	392	17537	100% mazout	Le Pigeonnier (Avusy)
M	Petites villas récentes > 2000** / 45 m ²	35.7	74%	300	13493	100% mazout	Dullier (Canton de Vaud)
N	Petites villas récentes > 2000** / 45 m ²	33.3	78%	300	13493	71% mazout 29% électricité	Machilly (France)
O	Petites villas récentes > 2000** / 45 m ²	35.7	74%	300	13493	71% mazout 29% électricité	Poisy (France)
P	Immeubles récents > 2010 - eco / 25-30 m ²	32.1	64%	200	6860	20% gaz 80% PAC lac	Les Vernets (Ville de Genève)

* Surface de plancher sans locaux communs.

*** villa modélisée identique

Tableau 1. Description des seize modes d'habitat sélectionnés.

1.3 Résultats et analyse

Les résultats obtenus pour les différents modes d'habitat sont présentés en Figure 2 et 3 (impact sur le réchauffement climatique en kg de CO₂-équivalent par personne par an), en distinguant les impacts liés au logement (chauffage mazout ou gaz en **bleu**, chauffage autres vecteurs en **vert**, énergie grise des matériaux en **gris**) et ceux découlant de la mobilité (différentes classes d'orange) indiquant soit les modes de transport (transport individuel motorisé **TIM** ; transport en commun **TC**) soit le motifs de déplacement (**travail** ; autres motifs dits « **contraints** » tels que les achats ; **loisirs**).

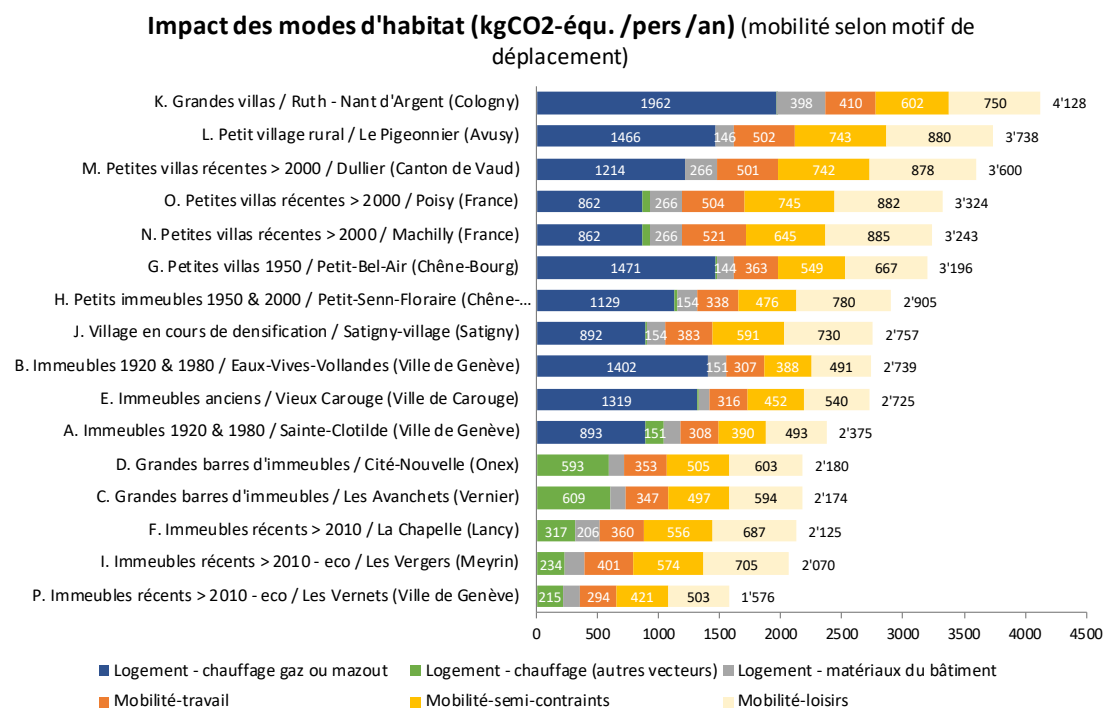


Figure 1. Comparaison des modes d'habitat (mobilité selon motif de dépl.) (en kg de CO₂-équ. / pers / an).

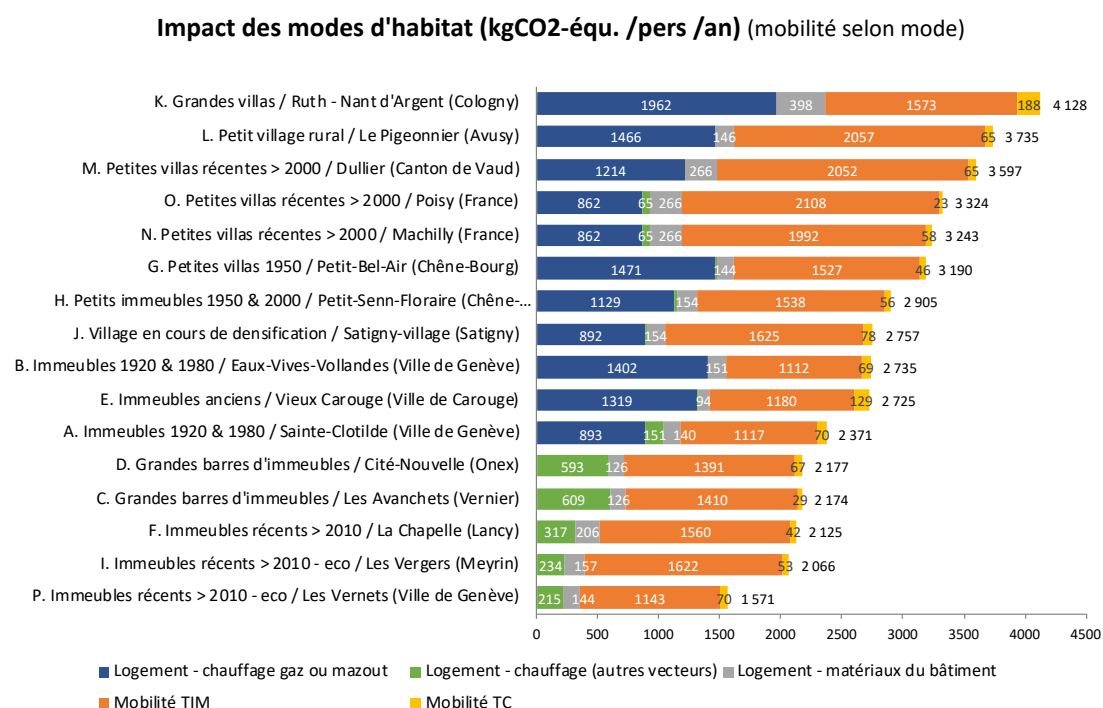


Figure 2. Comparaison des modes d'habitat (mobilité selon mode de dépl.) (en kg de CO₂-équ. / pers / an).

L'impact environnemental des modes d'habitat analysés est dominé par la mobilité (en moyenne 60%)². C'est l'utilisation des transports individuels motorisés qui en est largement la cause (57%) et, en matière de motif de déplacement, les loisirs (25%). L'impact du logement est néanmoins dominant dans certains cas où l'on observe une forte consommation de mazout pour le chauffage (en raison de l'ancienneté du bâti ou d'une grande surface habitée) avec un impact de la mobilité proportionnellement plus faible.

Pour la partie logement, le recours aux énergies fossiles (gaz et mazout) pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire constitue une part prépondérante de l'impact - 33% en moyenne - alors que les matériaux de construction ne représentent que 7% en moyenne. Si cette part d'impact liée aux matériaux est minime dans le cas de logements anciens, la situation est cependant différente pour les immeubles plus récents (mieux isolés) et les immeubles dont le chauffage n'est pas basé sur l'énergie fossile.

Le mode d'habitat avec la meilleure performance environnementale est le mode d'habitat P (Vernets) tandis que la moins bonne performance peut être observée pour le mode habitat K (Nant d'Argent), qui est 2.6 fois plus élevée. C'est le « logement » qui représente le plus grand facteur d'écart (facteur 6.6) alors que la mobilité ne varie que d'un facteur 1.8. Aujourd'hui, l'influence de la mobilité sur l'impact des modes d'habitat est en effet plus limitée dans la mesure où – en considérant les comportements actuels de notre agglomération – une part significative des besoins de mobilité est la même où que l'on habite.

La bonne performance du mode d'habitat P (Vernets) de 1.6 tonne de CO₂-équivalent par personne par an s'explique principalement par une part élevée d'énergie non-fossile, une surface habitée faible dans des immeubles récents avec un standard énergétique élevé et une centralité et une bonne desserte en transport publics qui réduit les distances et le recours à la voiture.

La mauvaise performance du mode d'habitat K (Nant d'Argent) de 4.1 tonnes de CO₂-équivalent par personne par an est expliquée par une utilisation importante de mazout pour le chauffage, un IDC relativement élevé et la surface habitée par personne la plus élevée de l'échantillon. Elle est aussi expliquée par une performance moyenne à faible en termes de mobilité.

Outre ces deux résultats situés aux extrêmes et qui se démarquent clairement, les résultats de performance intermédiaires peuvent être regroupés ainsi :

- **Des modes d'habitat à impact environnemental faible (émissions : 2 - 2.4 tonnes de CO₂-équivalent par personne par an)** caractérisés principalement par le recours à un chauffage au moins en partie alimenté par des énergies renouvelables. Les plus performants en la matière sont péjorés par un résultat médiocre en ce qui concerne la mobilité ou inversement.
- **Des modes d'habitat à impact environnemental moyen (émissions : 2.7 - 2.9 tonnes de CO₂-équivalent par personne par an)** caractérisés par deux combinaisons : soit une mauvaise performance énergétique du bâti « compensés » par une très bonne performance sur le plan de la mobilité, soit un résultat médiocre d'un point de vue mobilité en raison de leur localisation légèrement excentrée dans l'agglomération mais plutôt bon au niveau de l'énergie du bâtiment.
- **Des modes d'habitat à impact environnemental élevé (émissions : 3.2 - 3.7 tonnes de CO₂-équivalent par personne par an)** caractérisés par une combinaison de plusieurs éléments avec grand impact : une mobilité caractéristique de l'habitat diffus ou périphérique, une surface habitée élevée et une consommation d'énergie importante et fossile pour le chauffage.

Il est intéressant de mettre ces résultats en relation avec les cibles du plan climat cantonal. Selon ce document, chaque habitant-e du canton de Genève émet en moyenne environ 10 tCO₂e / an (valeur 2018). La trajectoire vise une réduction de -65% en 2030 (à savoir 3,5 tCO₂e/hab/an) et -90% en 2050 (tCO₂e/hab/an).

² Soit la part des émissions de la mobilité, en moyenne sur l'échantillon des modes d'habitat analysés. A noter ici que seules les émissions du périmètre « mode d'habitat » comme défini au §3.1 sont considérées. Une part importante de l'empreinte carbone n'est donc pas incluse ici (typiquement la consommation). Le plan climat cantonal donne la répartition complète suivante (périmètre canton de Genève) : énergie et bâtiments 39%, mobilité terrestre 26%, mobilité aérienne 7%, biens de consommation 28% (valeurs 2012).

1.4 Conclusions et perspectives

Cette étude pose les bases méthodologiques permettant d'évaluer l'impact environnemental d'une sélection de modes d'habitat de l'agglomération du Grand Genève. Les résultats obtenus permettent de quantifier sous forme d'empreinte carbone les facteurs déterminants de l'impact environnemental de différents modes d'habitat.

En synthèse, ce sont principalement **la surface habitée par personne, le recours à un chauffage fossile et l'usage de la voiture thermique qui creusent l'écart de performance entre les modes d'habitat analysés**. On peut en déduire que c'est bien l'urbanisme compact et la suppression du chauffage fossile qui constituent les leviers les plus efficaces pour réduire l'impact de l'habitat.

D'un point de vue méthodologique, **le logement et la mobilité sont considérés de manière adéquate**. Certaines données, peu robustes, demanderaient cependant un approfondissement (p. ex. les surfaces par habitant ou les IDC des zones villas). Il est également **souhaitable de mieux comprendre si, et comment, les aspects liés à la biodiversité pourraient être intégrés** pour évaluer les modes d'habitat de façon plus globale.

La méthodologie développée dans ce rapport offre les perspectives suivantes :

- L'application de la méthode à des cas spécifiques **d'aide à la décision** pour prendre en compte les objectifs climatiques dans les planifications territoriales **dans une logique de budget carbone** – et répondre ainsi par exemple à cette question : *quelle densité requise ou quel taux de report modal minimal dans un nouveau quartier des Cherpines pour atteindre les cibles du plan climat cantonal, resp. la société à 2000 W ?*
- L'élargissement de l'analyse des modes d'habitat à **l'ensemble de l'agglomération du Grand Genève** (par quartiers ou communes), ce qui permettrait d'avoir une cartographie de la répartition des modes d'habitat à l'échelle cantonale en fonction de leur impact environnemental et d'évaluer l'effet d'évolutions à venir (Genilac, Leman Express) sur l'empreinte carbone des quartiers
- La modélisation développée pour effectuer l'ACV de bâtiments réels mériterait d'être valorisée pour **vulgariser l'impact des choix architecturaux en termes de choix de matériaux ou énergétiques**. Un document public offrant une comparaison synthétique entre les impacts des différents types de bâtiments viendrait compléter les différents instruments existants à l'intention des maîtres d'ouvrage tels que les eco-devis et les données des écobilans.
- Le **modèle statistique mis en place pour la mobilité permet de déterminer**, en fonction des données du MRMT 2015, la probabilité qu'une personne habitant dans un quartier aux caractéristiques x ou y développe tel ou tel comportement de mobilité. Ce modèle évolutif – dont la précision peut être améliorée en l'enrichissant avec des données d'enquête de quartier offre une bonne base pour modéliser les comportements de mobilité des futurs quartiers et planifier les équipements et infrastructures en conséquence. **"Dis-moi à quoi ressemblera ton futur quartier et je te dirai quelle mobilité celui-ci générera demain !"**

2 Introduction

2.1 Contexte

La structure de l'urbanisation de l'agglomération du Grand Genève se caractérise par un centre-ville particulièrement dense, des couronnes suburbaines et en cours de densification, des villes « périphériques », ainsi qu'un territoire périurbain étendu composé de zones villas et de villages. Ces derniers sont également en mutation par une densification progressive.

La structure de l'urbanisation peut être associée à différents « modes d'habitat », qu'il est possible de qualifier, par exemple, en termes de consommation de sol, de ressources pour les constructions ou de consommation énergétique et de déplacements des personnes.

Le Département du territoire souhaite **déterminer l'impact environnemental de ces différents modes d'habitat du Grand Genève**, selon un échantillon sélectionné du territoire genevois complété par des cas d'études situés dans le Grand Genève vaudois ainsi qu'en France voisine. Le Département du territoire a sollicité en 2019 Sofies et Ecometrics pour un mandat d'étude visant à élaborer une méthodologie d'évaluation et des indicateurs-clés basés sur les outils d'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Un complément d'étude a été réalisé en 2021 avec l'appui du bureau de recherche 6-t.

2.2 Objectifs du rapport

Les principaux objectifs du présent rapport sont les suivants :

- Apporter des éléments de compréhension quant à l'impact environnemental de différents modes d'habitat représentatifs à Genève,
- Fournir une aide à la décision en matière d'aménagement du territoire et de durabilité fondée sur des arguments environnementaux scientifiquement solides,
- Permettre une communication efficace avec des experts et le grand public.

Ce rapport est le résultat de plusieurs **étapes de travail³ visant à développer une méthodologie robuste**, fondée sur des bases scientifiques reconnues, et apportant des réponses quant à l'impact environnemental actuel de différents modes d'habitat. Les hypothèses de travail validées avec le groupe de pilotage de l'étude sont présentées en Annexe 4. Une réponse leur est apportée dans le Chapitre 7 (Conclusion).

La démarche est tout d'abord brièvement décrite dans le Chapitre 3 (de plus amples explications méthodologiques sont fournies dans les Annexes 1 et 2). Les modes d'habitat retenus ainsi que leurs caractéristiques déterminantes sont ensuite décrits dans le Chapitre 4. Les impacts environnementaux résultant de l'Analyse de Cycle de Vie sont présentés et discutés dans le Chapitre 5. Les limites de l'étude sont décrites dans le Chapitre 6. La conclusion (Chapitre 7) met en évidence des opportunités d'utilisation de la méthode et des résultats à des fins d'aide à la décision en matière d'aménagement du territoire.

³ Le mandat a été effectué en plusieurs étapes : une exploitation des données statistiques publiquement disponibles au niveau de sous-périmètre statistiques et la prise en compte uniquement de la mobilité pendulaire (étape 1), la modélisation de cas d'études portant sur des quartiers récents ou situé en dehors du canton (étape 2) et enfin l'élargissement de l'analyse aux autres motifs de mobilité tels que les loisirs et les achats pour obtenir un profil plus complet de la mobilité des habitants du territoire (étape 3).

3 Méthodologie

3.1 Les modes d'habitat

Définition et périmètre de l'analyse

Un **mode d'habitat** peut être défini de plusieurs manières⁴. Dans ce rapport, une application restrictive de cette notion est appliquée, couvrant deux composantes choisies pour leur aspect non-discrétionnaire (c'est-à-dire pas uniquement dépendant d'aspects comportementaux ou de préférences personnelles) :

- Le **logement**, pour lequel sont considérés la consommation d'énergie (chauffage et eau chaude sanitaire) ainsi que les matériaux du bâti. Typiquement la consommation d'électricité (hors chauffage) ainsi que l'ameublement intérieur ne sont pas considérés car ils ne sont pas directement liés au mode d'habitat⁵.
- La **mobilité**, pour laquelle sont considérés l'infrastructure, les véhicules ainsi que la consommation d'énergie pour l'ensemble des motifs de déplacement de la mobilité terrestre quotidienne⁶ (domicile-travail, formation, achats, visites, loisirs, etc.). Les caractéristiques du mode d'habitat du point de vue de la mobilité sont la densité humaine, l'offre TC (qualité de desserte et accessibilité) et la contrainte de stationnement.

Il est à noter que d'autres définitions seraient envisageables. Une définition plus large - actuellement étudié au niveau de la recherche académique - serait, par exemple, de considérer le quartier⁷ ou la ville (et non l'habitat) comme l'échelle d'analyse pertinente et donc d'inclure également d'autres infrastructures partagées (équipements publics comme les écoles, bureaux et commerces, etc.).

Sélection des modes d'habitat et données disponibles

Les seize modes d'habitat présentés dans le Chapitre 4 ont été sélectionnés afin d'illustrer la diversité des modes d'habitat du canton de Genève et du Grand Genève.

Lors d'une première étape de travail, dix modes d'habitat ont été sélectionnés de manière intuitive afin de représenter du mieux que possible la majorité des modes d'habitat à Genève, au niveau de leurs paramètres (typologie de bâtiments, source d'énergie, distance au bassin d'emploi, etc.). La composante « logement » de ces dix modes d'habitat a été modélisée **à partir des données statistiques existantes** à l'échelle de sous-secteurs statistiques⁸. Ces secteurs sont généralement constitués d'un ensemble plus ou moins homogène de bâtiments, par exemple Eaux-Vives - Vollandes ou Satigny-Village.

Dans un deuxième temps, une autre méthodologie a été déployée pour évaluer la composante « logement » de **quartiers récents** (p.ex. Les Vergers à Meyrin ou Les Vernets à Genève) ou des quartiers situés à l'extérieur du canton de Genève, dans la mesure où les données statistiques ne sont pas (encore) disponibles. Ces **six modes d'habitat supplémentaires** ont ainsi été évalués à partir de cas d'étude concrets, en se basant sur une modélisation détaillée des caractéristiques du bâtiment.

⁴ Il n'existe pas de définition officiellement reconnue de la notion « mode d'habitat ».

⁵ Comme indiqué en Annexe 1, l'électricité varie fortement selon le type de logement (immeuble, maison) et le nombre de personnes dans un ménage. L'étude de son impact serait aussi intéressante mais sort du cadre de ce mandat.

⁶ Le périmètre de cette étude ne considère que les déplacements quotidiens. Sont donc exclus les voyages avec nuitée hors du domicile. En conséquence, les déplacements en avion ne font pas partie du périmètre du présent mandat. Pour autant, il est à noter que l'avion représente actuellement environ 50% des émissions de GES de la mobilité du canton de Genève. Cependant, le choix de partir en vacances dans un pays lointain ou de rester à proximité ne dépend pas du mode d'habitat mais davantage de préférences personnelles, du pouvoir d'achat, du mode de vie, etc.

⁷ Voir à ce sujet la fiche 4.3 du plan climat cantonal 2030 « Agir au niveau des projets de quartiers en vue de la réduction des émissions de CO₂, de l'adaptation au changement climatique et d'une habitabilité renouvelée »

⁸ Tel que définis par le Groupe Interdépartemental de Représentation Cartographique (GIREC) : <https://www.ge.ch/statistique/tel/publications/2006/analyses/etudes/an-ed-2006-40.pdf>. 394 sous-secteurs statistiques sont définis pour le canton de Genève.

Pour la composante « mobilité » des seize modes d'habitats, les données sont issues d'un traitement statistique des données du **Microrecensement mobilité et transport** (MRMT 2015) qui a permis de rattacher à chaque mode d'habitats (périmètres) des distances parcourues selon des modes et des motifs en fonction des facteurs explicatifs les plus déterminants (qualité de desserte en transport en commun, densité humaine, etc.) tout en « maîtrisant » l'effet du revenu des ménages. Cette méthodologie est décrite plus spécifiquement dans le chapitre 3.

A noter que dans une version précédente de cette étude, seule la mobilité pendulaire était considérée et analysée à partir des données disponibles au niveau des quatre zones typologiques du canton de Genève (centre, première et deuxième couronnes, périurbain). Compte tenu de l'importance des autres motifs⁹ de déplacement (78% des kilomètres annuels terrestres), ce complément indispensable a été ajouté en 2021.

Chaque mode d'habitat est basé sur un **exemple concret et les données disponibles les plus fines possibles** ont été utilisées pour la modélisation. Compte tenu de la qualité et de la granularité de celles-ci, les résultats présentés doivent être considérés comme une **approximation**. Cette approximation nous semble cependant suffisante pour comprendre à quel point les modes d'habitat, ainsi que les impacts environnementaux qu'ils induisent, diffèrent entre eux et quelles en sont les causes directes.

Les modes d'habitat sont décrits dans le Chapitre 4. Les sources de données et hypothèses servant à la modélisation sont disponibles dans les Annexe 2 et 3, pour le logement et la mobilité respectivement.

3.2 Analyse environnementale basée sur l'Analyse de Cycle de Vie

Une application de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV)

Les modes d'habitat sont évalués à l'aide d'une approche appelée « Analyse du Cycle de Vie » (ACV) ou écobilan (Jolliet et al., 2018). L'ACV permet d'évaluer l'impact environnemental d'un produit, d'un service ou d'un système en considérant toutes les étapes de son cycle de vie (extraction des matières premières et énergie, transformation en produit, transport entre les phases, utilisation et fin de vie). Plusieurs indicateurs sont généralement considérés, par exemple le réchauffement climatique et les impacts sur les écosystèmes afin d'obtenir une vision large en matière d'impacts environnementaux.

L'ACV permet ainsi de comptabiliser les multiples impacts environnementaux générés par un mode d'habitat de manière systémique, en considérant tant les impacts liés à la fabrication et la fin de vie du bâti, des routes ou des voitures que ceux liés à leur utilisation (production et consommation d'énergie pour le chauffage ou carburants des modes de transport par exemple).

Une évaluation de l'impact annuel d'une personne

Afin de pouvoir permettre une comparaison des modes d'habitat, les composantes « logement » et « mobilité » doivent être agrégées. Les impacts environnementaux sont ainsi tous ramenés à une grandeur comparable, un même service rendu :

« Se loger et se déplacer pour une personne durant une année. »

Les impacts sont ainsi évalués par personne par an (une personne moyenne durant une année). Cette personne moyenne est estimée en prenant en compte l'ensemble de la population. Concernant le logement, cela signifie que les adultes comme les enfants sont considérés sans distinction. Concernant la mobilité pour le motif « travail », cela signifie que les distances considérées prennent en compte le fait qu'une partie de la population est immobile pour ce motif.

Indicateur

Une seule problématique est considérée : le réchauffement climatique, calculé à l'aide de la méthode publiée par l'IPCC agréant l'ensemble des gaz à effet de serre. L'indicateur utilisé correspond aux émissions de gaz à effet de serre (GES) ; il est exprimé en kg de CO₂-équivalent (abrégié CO₂-e).

⁹ En plus de la mobilité pendulaire, sont considérés les motifs dits semi-contraints (accompagnement de personnes, achats et services, déplacements professionnels dans le cadre de l'activité, etc.) ainsi que les motifs de loisirs (shopping, restaurants et bars, loisirs multiples).

Il convient de noter que toute prise de décision basée sur les résultats de cette étude, demanderait la prise en compte d'autres indicateurs tels que considérés habituellement dans les évaluations basées sur l'ACV (les impacts sur les écosystèmes, les impacts sur la santé humaine ou l'utilisation des ressources sont par exemple souvent utilisés) et tel que recommandé par la norme ISO 14'040. Cette prise en compte permettrait d'éviter un transfert d'impact sur d'autres problématiques (par exemple une baisse de l'impact « réchauffement climatique » au détriment d'une augmentation des impacts en matière de santé humaine).

Sources des données d'ACV

Les données pour calculer les résultats quantitatifs sont principalement extraites de la base 2016 de la KBOB (Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics). Ces données sont publiques et gratuites. Elles sont, par exemple, reprises dans les cahiers techniques de la SIA (SIA 2031 Certificat énergétique des bâtiments (2009), SIA 2032 Énergie grise (2009), SIA 2039 Mobilité induite (2010) et SIA 2040 En route pour l'efficacité énergétique (2010) ainsi que dans le justificatif MINERGIE-ECO et dans le bilan du projet de société à 2000 watts) (KBOB, 2016).

3.3 Des données du microrecensement à un modèle statistique pour évaluer l'impact environnemental de la mobilité

Le microrecensement mobilité et transport et la base de données *mobitool*

Le Microrecensement mobilité et transport (2015) offre une base très exhaustive des pratiques de mobilité des résidents du Canton de Genève, puisque l'échantillon relatif compte un peu plus de 4'500 personnes ayant répondu à l'enquête. Chacun de ces personnes a renseigné de manière détaillée l'ensemble des déplacements effectués pendant une journée entière, de même qu'elle a indiqué de nombreuses informations relatives à son lieu de vie, les équipements de mobilité dont elle dispose ou d'autre caractéristiques spécifiques à elle et son ménage.

L'utilisation du MRMT a comme avantage de pouvoir considérer la mobilité et son impact tant du point de vue des modes que du point de vue des motifs de déplacement. En effet, au-delà de la mobilité pendulaire, la mobilité de loisirs compte pour une part importante du budget mobilité des personnes, et celle-ci se montre très variable au sein de la population du canton. À ces motifs de déplacement, s'ajoutent encore des mobilités contraintes relatives au travail, hors des déplacements pendulaires, ainsi que des déplacements liés au ménage, qu'il s'agisse d'achats et de services, mais également d'accompagnement de personnes.

Modes de déplacement		Motifs de déplacement	
Voiture conducteur	Transport individuel motorisé – TIM	Domicile <-> lieu de travail	Motifs contraints liés à l'activité
Voiture passager		Domicile <-> lieu de formation	
Deux-roues motorisés – 2RM		Déplacement dans le cadre de l'activité professionnelle	
Train	Transports en commun – TC	Achats et services	Motifs contraints liés au ménage
Autres transports en commun		Accompagnement de personnes	
Marche	Mobilité douce – MD	Visite de personnes	Motifs non contraints de loisirs
Vélo		Restaurants et bars	
Autre mode		Autres loisirs	

Tableau 2. Modes et motifs de déplacement issus du MRMT 2015 et considérés dans les analyses

L'utilisation du MRMT, en plus du caractère exhaustif des analyses qu'il permet, a pour intérêt de détailler précisément les modes de transports utilisés. Ainsi, de manière plus précise encore que ce que montre le tableau ci-dessus, il est possible de calculer les émissions de CO₂ de manière extrêmement fine, en considérant notamment, le taux d'occupation, le poids, le type de motorisation des véhicules du transport individuel motorisé, mais également les spécificités des transports en commun urbains

(trolleybus, bus thermique, tram) ou encore du train (grandes lignes nationales, internationales, RER régional, etc.).

Sur cette base, pour chaque personne de l'enquête, il est possible d'établir l'impact environnemental journalier sur la base des distances parcourues et des modes de déplacements utilisés. Pour ce faire, la base de données *mobitool* (v2.0.2) fournit des coefficients d'émission par [km] en fonction du mode de transport utilisé. Notons que la base *mobitool* est particulièrement adaptée à cette démarche puisqu'elle permet l'évaluation de l'impact non seulement direct – lors du déplacement –, mais pour l'ensemble du cycle de vie (voir Annexe 3). Le calcul de l'impact journalier se base sur la somme de l'impact de chaque déplacement de la journée calculé précédemment. Chaque déplacement étant caractérisé par un mode ainsi qu'un motif, il est donc possible de déterminer l'impact environnemental pour chaque mode et pour chaque motif.

Finalement, une fois cela effectué pour toutes les personnes, des valeurs moyennes peuvent être calculées pour des sous-groupes de population, selon des critères multiples, notamment des caractéristiques socioterritoriales dans le cadre de ce mandat – relatives aux modes d'habitat.

Construction d'un modèle statistique

La méthodologie s'appuie sur un modèle statistique permettant de rendre compte des **comportements de mobilité moyens des personnes**, uniquement du point de vue des caractéristiques de leur lieu de résidence, à savoir le mode d'habitat. Pour ce faire, il s'agit premièrement d'identifier les composantes du modèle : **quels sont les caractéristiques des modes d'habitat qui ont le plus d'influence sur la mobilité des personnes ?** Une fois ces caractéristiques identifiées, celles-ci sont mises à profit dans un modèle qui est calibré à l'échelle de l'ensemble du Canton de Genève, puis utilisé pour calculer les impacts de chaque mode d'habitat.

L'établissement d'un modèle se révèle pertinente pour deux raisons :

- Les données à disposition n'étant pas suffisamment nombreuses au niveau de chacun des modes d'habitat, il est nécessaire d'analyser, à l'échelle de l'ensemble du Canton de Genève, toutes les portions de territoire partageant les caractéristiques des différents modes d'habitat. Ce faisant, l'information disponible dans le MRMT permet d'établir pour chacun des modes des comportements moyens.
- En calibrant un modèle à l'échelle de l'ensemble du Canton, celui-ci peut ensuite être mis à profit dans l'évaluation de nouveaux projets d'aménagement, dans une logique de planification. Le modèle n'est donc plus seulement un outil descriptif des modes d'habitat de la présente étude, il permet également d'offrir un outil d'aide à la décision dans une démarche prospective.

Pour chaque répondant du MRMT, les coordonnées géographiques permettent de localiser le lieu de domicile avec une précision de l'ordre du mètre. De plus, les caractéristiques décrivant les modes d'habitat du point de vue de la mobilité peuvent être déterminées pour tout point du territoire. Ce faisant, il n'est pas nécessaire de recourir à un découpage, pour n'importe quel point du territoire, il est possible de déterminer l'impact potentiel de la mobilité du point de vue des facteurs retenus, et par extension, pour tout répondant du MRMT selon la localisation de son lieu de résidence.

4 Les modes d'habitat

Les seize modes d'habitat sont tout d'abord présentés. Leurs différentes composantes sont ensuite décrites en faisant ressortir les traits saillants du canton de Genève en termes structurels et environnementaux. Cette description a pour objectif de permettre une meilleure compréhension des enjeux actuels et des aspects clés de la modélisation des impacts. Les modes d'habitats définissent des types selon diverses caractéristiques décrites ci-dessous, de plus ils comportent tout un exemple. Pour autant, ces modes peuvent se retrouver dans diverses localisations au sein du territoire d'analyse et ces localisations peuvent être différentes de celle de l'exemple considéré. Du point de vue de la mobilité, les valeurs présentées constituent une moyenne de l'ensemble des localisations d'un type, et non pas une valeur propre à l'exemple retenu.

4.1 Description et cartographie

Les seize modes d'habitat sélectionnés couvrent :

- Une diversité de typologies urbaines de densité variable composée de différents types de bâtiments (petites et grandes villas, petits et grands immeubles, urbanisation pavillonnaire ou villageoise) d'âge variable.
- Une proportion variable des sept types de source d'énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire : mazout, gaz, chauffage à distance (CAD), pompe à chaleur (PAC), électricité directe, bois pellets et autres.
- Une diversité de localisations (centre, première et deuxième couronnes, périurbain, agglomération de Nyon, France proche et plus lointaine) qui influence en particulier la mobilité des personnes en matière de distances parcourues et modes de transport : voiture, deux-roues motorisé, transport collectif, mobilité douce (marche, vélo...).

Un aperçu des valeurs considérées pour chacun des modes d'habitat est donné dans le Tableau 3 et leur localisation est illustrée en Figure 4.

Pour plus de précisions sur les données et hypothèses ayant servi à décrire de façon chiffrées les modes d'habitat, se référer aux Annexe 2 (Modélisation du logement) et Annexe 3 (Modélisation de la mobilité). Les hypothèses et la discussion de valeurs de distances parcourues (km/pers/j) sont développés au §5.2.

#	Type de bâti / surface habitée* (m2/pers)	Mobilité		Energie de chauffage			Exemple sélectionné Sous-secteur statistique/ commune
		km/j/pers	% TIM	IDC [MJ/m ²]	Quantité (MJ/pers)	Agents énergétiques	
A	Immeubles 1920 & 1980 / 38 m2	27.6	56%	423	16067	40% gaz 36% mazout	Sainte-Clotilde (Ville de Genève)
B	Immeubles 1920 & 1980 / 41 m2	27.6	56%	449	18252	60% mazout 40% gaz	Eaux-Vives-Vollandes (Ville de Genève)
C	Grandes barres d'immeubles / 34 m2	32.1	64%	406	14006	50% gaz 50% déchets	Les Avanchets (Vernier)
D	Grandes barres d'immeubles / 34 m2	32.1	64%	396	13643	50% gaz 50% déchets	Cité-Nouvelle (Onex)
E	Immeubles anciens / 42 m2	32.1	64%	432	18252	54% gaz 46% mazout	Vieux Carouge (Ville de Carouge)
F	Immeubles récents > 2010 / 30-35 m2	32.8	70%	200	9400	50% gaz 50% déchets	La Chapelle (Lancy)
G	Petites villas 1950 / 39 m2	29.1	67%	544	21132	68% gaz 31% mazout	Petit-Bel-Air (Chêne-Bourg)
H	Petits immeubles 1950 & 2000 / 35 m2	33.3	72%	461	16194	57% gaz 40% mazout	Petit-Senn-Floraire (Chêne-Bourg)
I	Immeubles récents > 2010 - eco / 30-35 m2	32.1	71%	150	7050	50% gaz 50% déchets	Les Vergers (Meyrin)
J	Village en cours de densification / 36 m2	32.8	70%	366	13120	47% mazout 45% gaz	Satigny-village (Satigny)
K	Grandes villas / 69 m2	35.8	74%	437	30136	85% gaz 13% mazout	Ruth-Nant d'Argent (Cologny)
L	Petit village rural / 45 m2	35.7	74%	392	17537	100% mazout	Le Pigeonnier (Avusy)
M	Petites villas récentes > 2000** / 45 m2	35.7	74%	300	13493	100% mazout	Dullier (Canton de Vaud)
N	Petites villas récentes > 2000** / 45 m2	33.3	78%	300	13493	71% mazout 29% électricité	Machilly (France)
O	Petites villas récentes > 2000** / 45 m2	35.7	74%	300	13493	71% mazout 29% électricité	Poisy (France)
P	Immeubles récents > 2010 - eco / 25-30 m2	32.1	64%	200	6860	20% gaz 80% PAC lac	Les Vernets (Ville de Genève)

* Surface de plancher sans locaux communs.

*** villa modélisée identique

Tableau 3. Description des seize modes d'habitat sélectionnés.

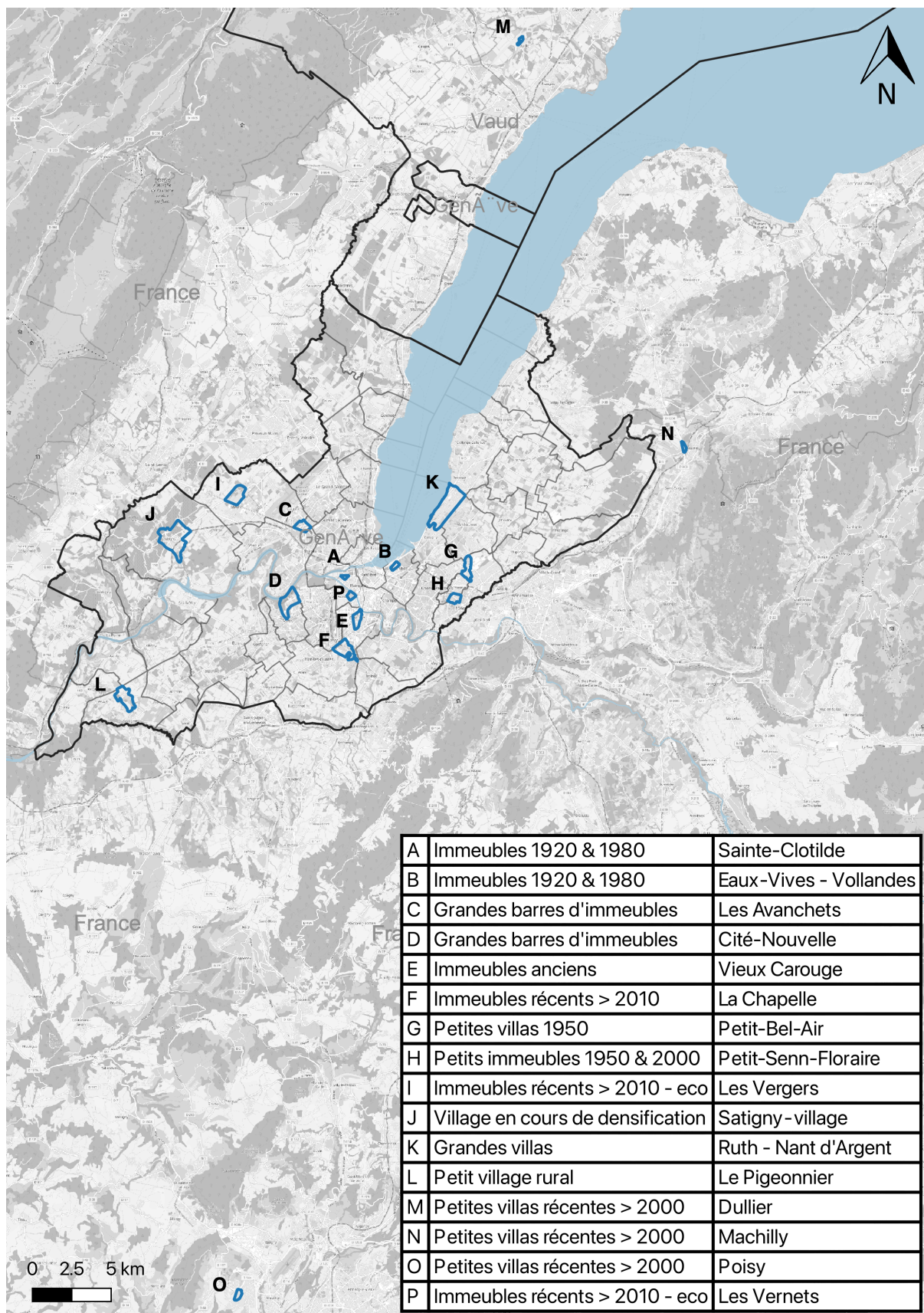


Figure 3. Localisation des périmètres utilisés pour illustrer les modes d'habitat.

4.2 Le logement : caractéristiques déterminantes

Dans le canton de Genève (au quatrième trimestre 2019), parmi les 50'217 bâtiments, 73% (36'511) sont à usage d'habitation uniquement, 16% (7'799) sont à usage mixte et 12% ne sont pas résidentiels. Plus de la moitié (51%) des bâtiments sont des maisons individuelles. Ces maisons individuelles n'offrent cependant que 11% des 236'791 logements existants : 89% des logements sont donc des appartements situés dans des immeubles (OCSTAT, 2019).

La surface par habitant

La surface des logements ainsi que la densité varient fortement selon les périmètres : la surface moyenne par habitant varie tout autant. Au sein du canton, celle-ci varie ainsi entre 30 m² et 69 m² par personne (un facteur 2) pour les modes d'habitat sélectionnés. La qualité de cette estimation de la surface par personne est cependant considérée comme faible bien que basée sur les recommandations de l'OCSTAT.

La surface moyenne par habitant influence fortement les calculs de l'impact environnemental puisque les impacts environnementaux de la consommation énergétique et des matériaux du bâti alloués à chaque personne sont calculés au niveau des logements puis attribués à chacun de leurs habitants. À matériaux et consommation énergétique égaux, les habitants du mode K (Nant d'Argent) auraient ainsi, par exemple, un impact lié au logement égal au double des habitants du mode C (Les Avanchets) compte tenu d'une surface quasiment double par personne.

La surface par habitant peut être définie de plusieurs manières (par exemple, en considérant les murs intérieurs ou non, ou alors en considérant les locaux communs (dont la place augmente dans les nouvelles constructions) ou non, ou encore par rapport à un calcul standardisé comme la Surface de Référence Énergétique). Compte tenu de l'impossibilité, en l'état actuel des informations disponibles, d'obtenir des données selon une définition unique pour l'ensemble des modes d'habitats considérés dans ce rapport, le type de surfaces par habitant utilisé varie selon les modes d'habitats. Plus d'information est disponible en Annexe 2 sur cet aspect et les conversions utilisées entre les différentes définitions.

Les types de bâtiment

Il n'existe pas de base de données définissant le type de matériaux utilisés pour les bâtiments du canton de Genève. L'OCSTAT fournit une statistique des « bâtiments à usage d'habitation et maisons individuelles, selon la période de construction, par commune », reprise également par l'OFS selon des catégories similaires.

La typologie du bâti utilisée pour le volet mobilité de cette étude a été initialement élaborée par Martin Schuler de l'EPFL. Elle s'appuie sur les données de la statistique des bâtiments et des logements, produite par l'OFS et sur les registres de lieu de résidence des communes. La base de données StatBL - qui recense la quasi-totalité des bâtiments d'habitation en Suisse en les localisant au niveau des coordonnées géographiques - renseigne notamment le type de bâtiment, le nombre d'étages et le nombre de logements, s'agissant des bâtiments à fonction d'habitation totale ou partielle. Sur cette base, la typologie, dans la version utilisée pour cette étude, permet de définir 5 catégories de bâtiments d'habitation :

- Maison individuelle
- Maison mitoyenne
- Immeuble
- Tour
- Autre (notamment bâtiment mixte et ferme)

Catégories	Typologie	Nombre	%	%
Maisons individuelles	Petites maisons d'habitation ancienne (<1919)	4 048	9.6%	57.2%
	Villas 1920-1945	3 086	7.4%	
	Villas 1946-1970	5 319	12.7%	
	Villas récentes 1971-1990	5 156	12.3%	
	Villas contemporaine > plus 1990	6 399	15.2%	
Maisons mitoyennes	Habitations mitoyennes anciennes	909	2.2%	11.0%
	Habitations mitoyennes 1919-1970	654	1.6%	
	Habitations mitoyennes modernes	3 051	7.3%	
Immeubles	Petits bâtiments à usage mixte anciens	568	1.4%	26.5%
	Petits bâtiments à usage mixte non-anciens	1 203	2.9%	
	Immeubles anciens	1 975	4.7%	
	Immeubles 1919-1945	1 056	2.5%	
	Immeubles 1946-1970	2 746	6.5%	
	Immeubles 1971-1990	1 298	3.1%	
	Immeubles contemporains >1990	2 278	5.4%	
	Tours	1 510	3.6%	
Tours Autres	Bâtiment sans logements	112	0.3%	1.7%
	Autres bâtiments	609	1.5%	
Total		41 977	100.0%	100.0%

Tableau 4. Nombre et répartition des bâtiments résidentiels sur le canton de Genève selon la typologie établie par M. Schuler

D'autre part, une étude « eREN », effectuée par la HES, propose 10 études de cas couvrant des immeubles de 1901 à 1988 dans les cantons de Genève Vaud (Schwab et al., 2016). Quatre bâtiments décrits dans cette étude sont représentatifs des modes d'habitats de ce rapport :

- **Type 1, basé sur le cas d'étude 1 (1901)** : Bâtiment de 6 étages en ordre contigu situé en centre-ville de Genève. Façade monolithique de grande épaisseur (moellons et briques) recouverte de pierre naturelle apparente. Planchers généralement en bois. Exemple : Eaux-Vives (B)
- **Type 2, basé sur le cas d'étude 4 (1945)** : Bâtiment de 4 étages implanté dans les quartiers périphériques des villes. Façade en béton, parfois en préfabriqué. Planchers en béton. Exemple : Cité-Nouvelle (D)
- **Type 3, basé sur le cas d'étude 7 (1975)** : Bâtiment de 12 étages implanté dans les quartiers périphériques des villes. Façade en béton, parfois en préfabriqué. Planchers en béton. Exemple : Les Avanchets (C).
- **Type 4, basé sur le cas d'étude 10 (1988)** : Bâtiment de 6 étages en ordre non contigu implanté dans les villages. Façade en éléments préfabriqués en béton. Planchers en béton. Exemple : Satigny-Village (J).

Trois autres types de bâtiments peuvent être ajoutés pour représenter les types de villas et les immeubles récents considérés dans ce rapport.

- **Type 5 (> 2010)** : Bâtiment Rez + 5 étages moderne. Façade en éléments préfabriqués en béton. Planchers en béton. Exemple : La Chapelle (F).
- **Type 6 (> 2010)** : Bâtiment Rez + 5 étages moderne de type Minergie - eco. Façade en béton. Planchers en bois. Exemple : Vergers (I).
- **Type 7 (> 2000)** : Villa d'un étage moderne. Façade en béton. Planchers en béton. Exemple : Dullier (M).

Selon les données d'une étude menée par l'OCEN (2018) sur les bâtiments de plus de cinq preneurs d'énergie¹⁰ (ci-après immeubles), la moitié (54%, 7356 bâtiments) des immeubles de Genève

¹⁰ Il n'y a pas d'information disponible sur les villas et les bâtiments de moins de cinq preneurs d'énergie.

considérés a été construite avant 1970 dont la moitié (27%, 3657 bâtiments) avant-guerre. Le nombre d'immeubles construits chaque décennie après les années 1960 a été décroissant excepté dans les années 1990 qui ont vu se construire environ 15% du parc bâti actuel. Seul 110 immeubles ont été construits entre 2010 et 2015.

L'impact environnemental du bâti est fonction du type et de la quantité des matériaux le constituant (à la construction et en prenant en compte les rénovations ultérieures). L'impact alloué à chaque habitant annuellement dépend ainsi, outre le nombre d'habitants par bâtiment, de la durée de vie de celui-ci : plus la durée de vie est longue, plus l'impact du bâti par année sera faible.

Les bâtiments à Genève ayant, pour la majorité, entre 50 et 120 ans, l'impact environnemental des matériaux peut être considéré comme mineur au regard des impacts considérés selon une perspective de cycle de vie (voir ci-après « état des connaissances » et l'Annexe 1 pour plus d'information). Selon la littérature, dans le cas d'immeubles classiques d'un certain âge et dont le chauffage est basé sur l'énergie fossile, l'impact des matériaux représente environ 10% de l'impact environnemental induit par leur consommation d'énergie d'exploitation. La situation est cependant différente pour les immeubles plus récents (mieux isolés) et les immeubles dont le chauffage n'est pas basé sur l'énergie fossile. Dans le cas des six modes d'habitat basés sur les cas d'étude, l'impact des matériaux, calculé en se basant sur les plans d'architecte, se situe entre 22% (villas) et 67% (immeubles récents). Ce résultat est conforme aux attentes (voir Annexe 2). Il convient de noter que des durées de vie différenciées ont été considérées selon la date de construction des bâtiments (100 ans pour les bâtiments récents et 150 ans pour les bâtiments anciens) et non une durée de vie standardisées (60 ans selon la SIA), et ceci afin de représenter adéquatement le bâti ancien.

La consommation énergétique

Les données collectées à Genève permettent d'avoir une vision objective de la consommation énergétique des immeubles. D'après l'OCEN (2018), l'indice moyen de dépense de chaleur (IDC) des immeubles à Genève est de 119 kWh par m² (équivalent à environ 410 MJ par m²) et 58% des immeubles ont un IDC supérieur à cette moyenne. En équivalent mazout, cette consommation correspond à 12 litre/m² an.

Les bâtiments récents (après 1996) ont un IDC moyen inférieur. Ils sont en moyenne 35% meilleurs que les anciens. Les bâtiments rénovés avec haut standard énergétique se situent environ dans la même catégorie que les bâtiments récents mais peu de rénovations lourdes¹¹ ont cependant été effectuées à Genève (moins d'un tiers (27.3%) des bâtiments ont été rénovés).

La différence entre bâtiments anciens rénovés et bâtiments récents est ainsi inférieure à ce que laissent attendre les standards. Les bâtiments peuvent ainsi être classés en deux classes selon leur indice moyen de consommation (IDC) : les anciens (avant l'an 2000) avec un IDC de 490 +30 MJ/m² et les nouveaux avec un IDC de 330 +-15 MJ/m². À surface et énergie équivalentes par personne, les habitants d'un immeuble ancien ont ainsi un impact 50% supérieur aux habitants d'un immeuble récent. Il est également à noter que les bâtiments de petite taille ont, toute chose égale par ailleurs, un IDC moyen plus important.

Concernant les villas, l'évaluation des IDC est plus problématique puisque les données ne sont pas reportées systématiquement. À l'heure actuelle, les bâtiments comportant moins de 5 preneurs de chaleurs (villa et apparentés) sont exemptés du calcul de l'IDC par une pratique administrative (mais pas par la loi). Aucune statistique n'est ainsi disponible dans le rapport de l'OCEN (2018). Les données utilisées dans ce rapport sont ainsi basées sur une moyenne calculée à l'aide des données disponibles issues du SITG ainsi que d'un cas d'étude. L'IDC des villas considérées varie ainsi de 300 à 544 MJ/m².

Les IDC de l'échantillon des modes d'habitat analysés dans ce rapport varient ainsi entre 200 MJ/m² et 544 MJ/m² avec une moyenne de 430 MJ/m².

L'impact environnemental de la consommation énergétique est calculé en combinant cette information sur la quantité d'énergie consommée avec une information sur le type d'énergie. À Genève, la grande majorité des surfaces en immeuble (87%) sont chauffées à l'énergie fossile : 44% des surfaces sont chauffées au mazout et 43% au gaz. La majorité des immeubles chauffés au mazout n'ont pas encore été rénovés (leur IDC est donc important). Les villas éloignées du centre, n'ayant pas accès au réseau

¹¹ Une rénovation lourde permet un passage en classe efficiente (classe A, B ou C).

de distribution du gaz, sont généralement chauffées au mazout hormis en France où une partie d'entre elles (29% en moyenne) est chauffée à l'électricité.

Bien que de nouveaux modes de chauffage voient le jour à Genève (pompe à chaleur (PAC), solaire thermique, chauffage à distance (CAD), etc.), leur proportion est encore faible. Concernant le chauffage à distance, les réseaux de CAD étant reliés, une partie importante de l'énergie provient encore du gaz¹².

D'après l'OCEN (2018), le mazout et le gaz pour le chauffage sont ainsi responsables de 95% des émissions de gaz à effet de serre du chauffage à Genève (mazout : 57%, gaz : 38%).

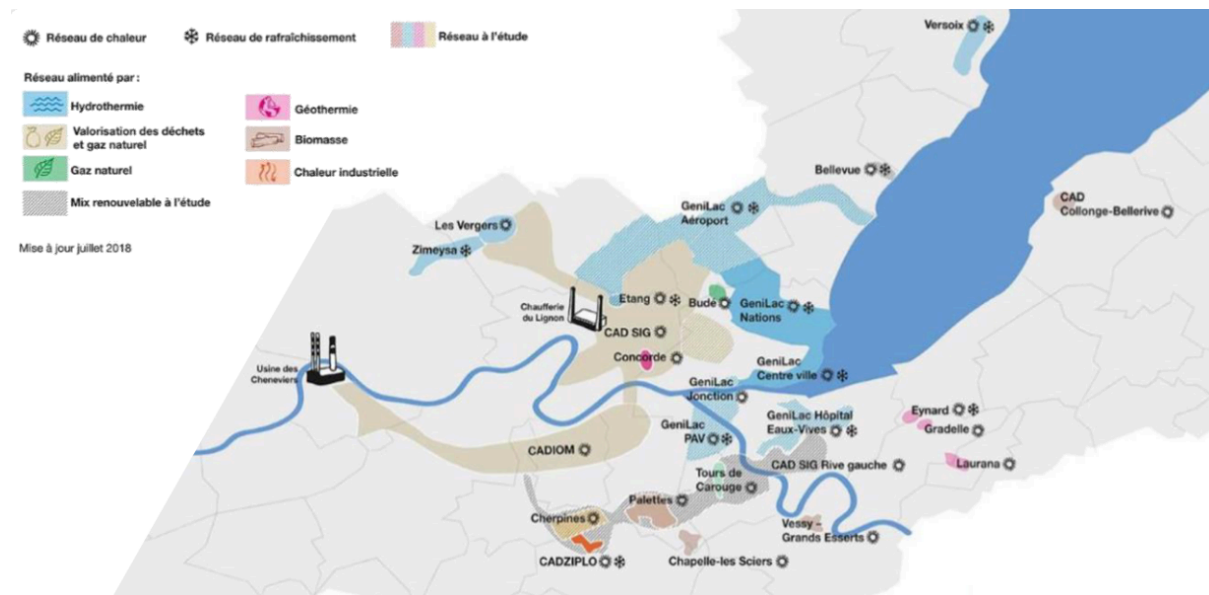


Figure 4. Aperçu des différents chauffages à distance (existants ou planifiés) et source d'énergie (SIG)

Les impacts environnementaux du logement : état des connaissances

Dans une étude générée pour l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV), Kaenzig et Jolliet (2006) comparent les impacts environnementaux de différents types de bâtiments en Suisse (en écopoints¹³ par personne par an). Selon Kaenzig et Jolliet (2006), dans un bâtiment traditionnel (construit avant les années 1980), dont la performance thermique est mauvaise, les impacts environnementaux annuels sont principalement (environ 33%) dus à l'utilisation du bâtiment (consommation d'énergie, en particulier pour le chauffage). La part liée à l'électricité est d'environ un tiers également.

La part des impacts liés à la construction du bâtiment, ses matériaux ainsi que sa fin de vie est mineure (15% pour une durée de 50 ans, moitié moins (7.5%) pour une durée de 100 ans)¹⁴. Plus l'isolation est performante (bâtiments après rénovation ou nouveaux standards énergétiques), plus la part des impacts induits par les matériaux devient cependant proportionnellement importante (puisque la part de l'énergie de chauffage et d'électricité consommée diminue).

La part des matériaux est cependant en forte augmentation dans les constructions récentes. Dans une étude plus récente, réalisée pour l'Office cantonal de l'énergie du canton de Zürich, Alig et al. (2020) estiment que, pour un bâtiment résidentiel situé à Zurich (sur Rautistrasse), les émissions de carbone liées aux matériaux sont de l'ordre de 80% sur l'ensemble de durée de vie du bâtiment (établie selon les recommandations des normes SIA, c'est-à-dire 60 ans), celui-ci étant chauffé selon un système de

¹² Il peut être considéré que, en moyenne, les émissions sont ainsi équivalentes à 50% de celles du gaz. Source : communication personnelle de SIG.

¹³ La méthode dite de la « saturation écologique », une méthode de l'Office fédéral de l'environnement synthétisant l'ensemble des charges environnementales résultant de l'utilisation des ressources énergétiques, de la terre et de l'eau douce, des émissions dans l'air, l'eau et le sol, ainsi que de l'élimination des déchets (en écopoints ou UBP, Umwelt Belastung Punkten en allemand). Cette méthode suisse a été élaborée en collaboration avec les milieux de la recherche et de l'industrie ainsi que des offices fédéraux (Office fédéral de l'environnement, 2013).

¹⁴ D'où une hypothèse moyenne d'un impact annuel de 10% tel qu'utilisé dans ce rapport.

pompe à chaleur sol-air. Les émissions par année (matériaux + chauffage) sont estimées à 11.8 kg CO2-e par personne actuellement et projetées à 5.1 kg CO2-e d'ici 2030 grâce aux évolutions technologiques.

Le choix de la source d'énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire influence fortement l'impact environnemental du logement. À surface équivalente par personne, se chauffer au mazout a, par exemple, un impact environnemental (réchauffement climatique) 30% supérieur au gaz.

Une information plus détaillée est fournie en Annexe 2.

4.3 La mobilité : caractéristiques déterminantes

Distances, modes et motifs de déplacements dans le canton de Genève

À l'échelle du Canton de Genève pour une année entière, **les personnes parcourent en moyenne 30.3 km par jour** (MRMT 2015). 67% de ces distances sont parcourues en transports individuels motorisés, avec une forte utilisation de **la voiture, représentant à elle seule 64% des distances journalières**. Les transports en commun représentent pour leur part 23% des distances journalières, suivi de la mobilité active qui représente 10%.

En termes de motifs, ce sont **les loisirs qui représentent le premier poste en termes de distances parcourues, avec 48% des distances** (pour les 3 motifs « visites », « restaurants et bars » et « autres loisirs »). Les déplacements contraints liés à l'activité (domicile-travail/étude et déplacements professionnels.) représentent pour leur part 22% des déplacements à l'échelle de la semaine entière. Notons toutefois que du lundi au vendredi, leur part atteint 35%. Finalement, les achats et services ainsi que l'accompagnement de personnes regroupent 19% des distances parcourues.

Du point de vue des caractéristiques socio-démographiques, les hommes se déplacent plus que les femmes, et les 16-24 ans sont les personnes parcourant les plus grandes distances journalières. D'autre part, ce sont les résidents du périurbain genevois qui parcourent les plus grandes distances journalières, avec 38.7 km en moyenne, contre 26.2 km en moyenne pour les résidents de la Ville de Genève.

Rappelons que ces chiffres ne concernent pas la mobilité liée aux voyages avec nuitées, comme précisé précédemment (voir note de bas de page n°5, p. 13). Pour référence, à l'échelle suisse, la mobilité quotidienne¹⁵ représente 63% des distances annuelles parcourues par les personnes.

Sur la base de l'ensemble des distances parcourues, il est possible de calculer l'impact environnemental respectif moyen que représente chaque motif de déplacement et chaque des modes de transports utilisés.

Émissions journalières moyennes par mode		Émissions journalières moyennes par motif	
Voiture conducteur	2.59	Domicile - travail	0.63
Voiture passager	0.91	Domicile - formation	0.06
2RM	0.15	Déplacement professionnel	0.22
Train	0.05	Achats et services	0.60
Autres TC	0.10	Accompagnement	0.21
Marche	-	Visites	0.33
Vélo	0.01	Restaurants et bars	0.19
Total	3.81	Autres loisirs	1.57
		Total	3.81

Tableau 5. Émissions journalières pour un résident moyen du canton de Genève, selon les modes de déplacement et selon les motifs de déplacement [kg équ. CO2 par jour]

Les transports individuels motorisés sont responsables d'une partie extrêmement significative de l'ensemble de l'impact environnemental des mobilités des résidents du Canton de Genève. En effet, à eux seuls, ils représentent 96% de l'impact environnemental total. Du point de vue des motifs, ce sont

¹⁵ Le MRMT distingue la mobilité quotidienne de la mobilité occasionnelle qui ensemble constituent la mobilité totale. La mobilité occasionnelle étant composée des voyages avec nuitée(s) hors du domicile ainsi que des excursions d'une journée (temps de transport > 3 heures), la mobilité quotidienne constitue le « restant ».

avant tout les loisirs qui dominent (55% pour les trois motifs « visites », « restaurants et bars », « autres loisirs »). La catégorie « autres loisirs »¹⁶ pèse pour 41% de l'impact. Bien que la mobilité pendulaire (motif « domicile – travail ») ait un impact notable, elle ne représente 18% de l'impact global.

Identification des facteurs socioterritoriaux déterminants

Dans le but de pouvoir établir le modèle dans la partie suivante, le diagnostic de l'impact environnemental journalier a été croisé avec différents facteurs socioterritoriaux pour évaluer leur influence sur les comportements de mobilité. Les facteurs analysés ci-après peuvent influencer l'impact environnemental de la mobilité des personnes. En particulier, **ces facteurs auront tendance à déterminer le choix modal des personnes, soit le choix d'utiliser un véhicule privé thermique, les transports en commun ou des modes doux, comme le vélo ou la marche par exemple.** En optant pour les modes alternatifs au transport individuel motorisé, l'impact environnemental de la mobilité des personnes aura tendance à être plus réduit.

Le niveau de qualité de desserte en transports en commun

Cet indice a été élaboré par l'Office fédéral du développement territorial (ARE) et est ainsi disponible pour la Suisse entière, dont l'ensemble du territoire du Canton de Genève. L'indice qualifie le territoire selon la proximité aux arrêts de transport en commun et selon la desserte dont disposent ces arrêts. Sont donc pris en compte le type de transports en commun (train, bus, tram, etc.) et la fréquence de desserte. Plus la fréquence est élevée et plus l'on est proche de l'arrêt, meilleure sera la qualité de desserte. En moyenne, une bonne qualité de desserte en transports en commun favorise l'usage de ces derniers, au détriment des TIM.

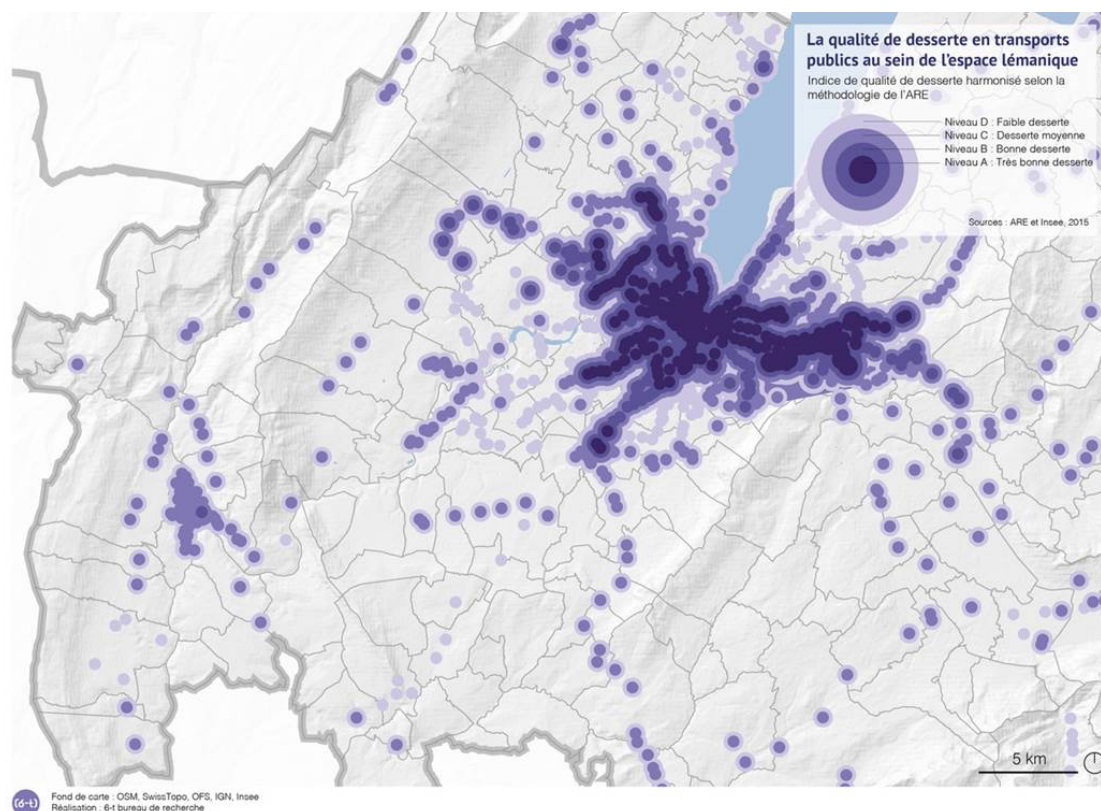


Figure 5. Représentation de la qualité de desserte en transports publics dans le Grand Genève

L'accessibilité territoriale en transports en commun

L'accessibilité territoriale en transports en commun permet elle aussi de rendre en compte de l'offre en transports en commun du territoire, mais selon une autre perspective. En effet, cet indice se base sur une matrice de temps de parcours en TC au sein du territoire cantonal. Cette matrice se base sur un

¹⁶ Elle comprend notamment la culture et le sport passif, les activités de bénévolat, associatives et relatives à la religion, le shopping, les activités extérieures non sportives, les activités extérieures sportives.

découpage en environ 500 zones, et elle fournit, pour chaque couple de zones, le temps de parcours nécessaire pour se rendre de l'une à l'autre. D'autre part, chaque zone est caractérisée par le nombre d'emploi et de population résidente s'y trouvant.

Partant, il est possible d'évaluer un indice pour chaque zone rendant compte de l'accessibilité gravitaire comprise comme les emplois et personnes accessibles dans les autres zones corrigées du temps de parcours requis. Ainsi, plus le nombre de personnes et d'emplois accessibles est élevé et plus le temps de parcours nécessaire est réduit, plus l'indice d'accessibilité sera élevé. Cet indice ne comporte donc pas d'unité de mesure autre que des « points » d'accessibilité.

Pour distinguer cet indice du niveau de qualité de desserte en TC, on peut dire que le premier répond à la question : y'a-t-il un arrêt de TC à proximité et est-il bien desservi ? En revanche, l'accessibilité permet pour sa part de répondre à la question : est-il rapide de rejoindre en TC les principales zones d'emplois et de population ?

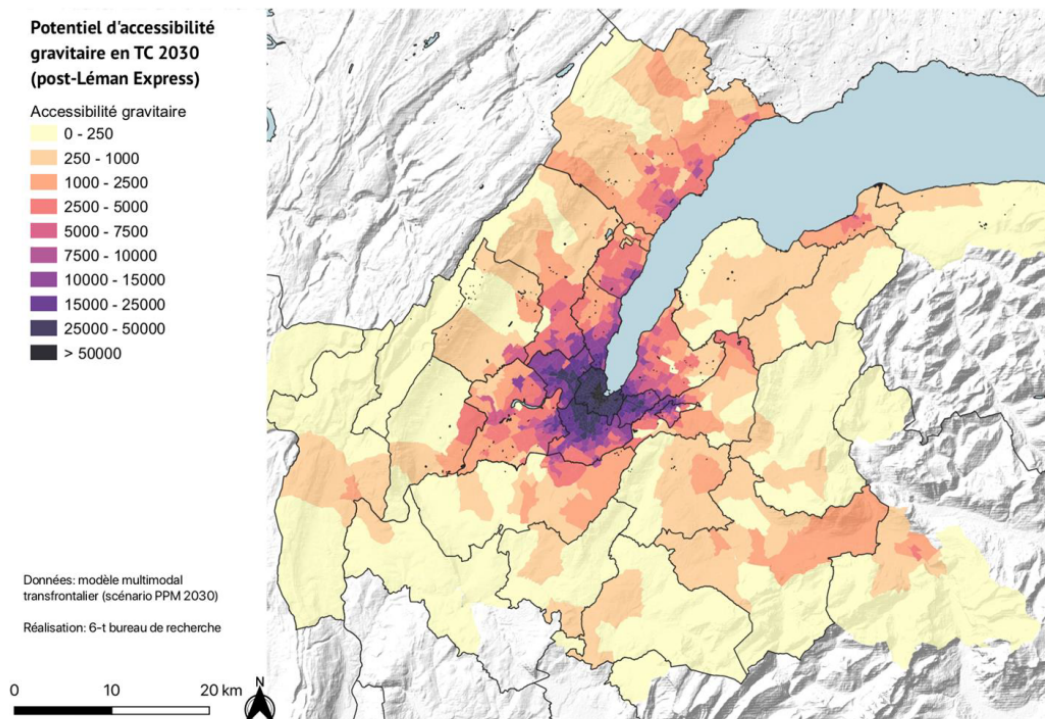


Figure 6. Représentation de l'indice d'accessibilité gravitaire en transport en commun dans le Grand Genève

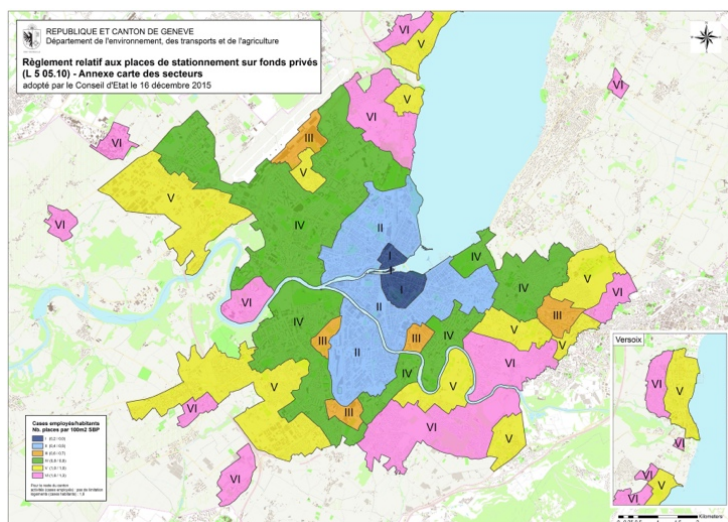
Densité humaine du lieu de résidence

La densité humaine du lieu de résidence se base sur le nombre de personnes résidentes ainsi que d'emplois rapporté à une surface. Pour établir cet indice, un cercle de 300 [m] de rayon a servi de surface de référence pour chaque personne renseignée dans le MRMT. Sur la base de ce cercle, la densité humaine a pu être calculée comme étant la somme des emplois et des personnes, divisée par la surface du cercle précédemment défini.

Globalement, plus la densité est élevée, moins les distances parcourues sont grandes. En effet, un nombre élevé de « choses » est accessible à courte distance. Parallèlement, les densités élevées sont moins propices à l'usage des TIM qui sont contraints par les dynamiques de congestion notamment, ainsi que par diverses politiques publiques dissuasives dans ces territoires. En conséquence, plus la densité du lieu de résidence est élevée, plus faible sera l'impact environnemental, ceci du fait d'un recours plus grand aux modes doux et collectifs, ainsi que des distances globalement plus faibles.

Régime de stationnement automobile

Parmi les politiques publiques dissuadant l'usage des TIM, celle portant sur le stationnement permettent de contraindre l'usage des véhicules individuels motorisé et restreignant l'espace disponible pour leur stationnement. Dans le Canton de Genève, le Règlement relatif aux places de stationnement sur fonds privés (RPSFP) régit l'aménagement de place de stationnement dans le cadre de construction ou de rénovation de bâtiment.



Secteur	Place / logement
I	0
II	0,5
III	0,7
IV	0,8
V	1,0
VI	1,3
Autre	1,6

Figure 7. Extraits du Règlement relatif aux places de stationnement sur fonds privés (L 5 05.10)

Dans le cadre de ce règlement, le territoire cantonal genevois a été divisé en différents secteurs au sein desquels les ratios de stationnement (par habitant et par visiteur) varient. Ces secteurs s'échelonnent de I à VI et plus l'indice est élevé, moins le stationnement est contraint. Les ratios de stationnement s'appliquent uniquement lors de nouvelles constructions (à travers le permis de construire). Cette variable est une indication de la contrainte pesant sur le stationnement automobile au sein du territoire¹⁷. La littérature indique que plus le stationnement sera contraint, plus les personnes se tourneront vers des modes alternatifs à la voiture individuelle. Ce faisant, cela s'accompagnera d'une réduction de l'impact environnemental moyen de la mobilité des personnes.

Type de bâtiment de résidence

Aux différents facteurs identifiés dans la littérature, s'ajoutent un cinquième facteur relatif à cette étude et rendant compte spécifiquement du bâti. L'inclusion de cet élément dans l'analyse s'inscrit avant tout dans une perspective exploratoire : est-ce que la forme du bâti influence les comportements de mobilité des personnes y résidant ? La typologie et la source de données utilisées est celle décrite dans le tableau 4 au §4.2.

Revenu du ménage

En plus des facteurs socioterritoriaux présentés ci-dessus, une dernière variable a été prise en compte dans l'analyse : le revenu. En effet, la littérature indique que les personnes disposant de hauts revenus auront généralement un impact environnemental lié à leur mobilité qui est plus élevé, ceci notamment du fait que leur mobilité sera généralement d'une plus grande intensité, au travers de déplacements plus fréquents et de plus grande distance. Pour pouvoir assurer la pertinence de cette variable dans l'analyse, il était nécessaire que celle-ci soit corrigée en fonction des caractéristiques des ménages. Ainsi, le revenu du ménage renseigné dans le MRMT a été corrigé sur la base des personnes vivant au sein du ménage, en différenciant les adultes des enfants.

L'inclusion du revenu dans les analyses a pour but d'identifier l'effet propre de chacun des facteurs socioterritoriaux, indépendamment de cette caractéristique individuelle des ménages. Comme nous le verrons ci-dessous, l'influence du revenu est en effet très significative.

L'annexe 3 présente les résultats d'une **analyse détaillée de l'impact environnemental** – calculé en CO₂ journalier moyen – en fonction des 5 facteurs socioterritoriaux ci-dessus **pour l'ensemble du territoire cantonal**.

Cette analyse met notamment en évidence une très **forte corrélation entre le revenu et les émissions de la mobilité**. La littérature souligne également à quel point le revenu, ou plus globalement le pouvoir

¹⁷ Cette donnée constitue un proxy pour estimer la contrainte de stationnement, compte tenu du fait qu'il n'existe actuellement pas de recensement exhaustif du stationnement sur terrain privé. Bien que le règlement ait un effet contraignant, il ne s'applique qu'aux nouvelles constructions et ne correspond donc pas au stationnement réel qui lui dépend du nombre de places sur le bâti existant (parkings privés en surface ou sous-sol, abonnements de parkings pour privés dans ouvrage public, macarons habitants en zone bleue).

d'achat, est souvent corrélé à l'intensité de la mobilité des personnes. En figure 7, on observe en effet que **l'impact journalier est presque multiplié par 3 entre la classe de revenu la plus faible et celle la plus élevée**. Dans le détail, s'agissant des seuls motifs de loisirs, ceux-ci sont effectivement multipliés par 3 entre les 2 classes extrêmes, tandis que d'autres motifs, comme les achats et services contraints par le ménage, auront tendance à stagner entre les différentes classes de revenu.

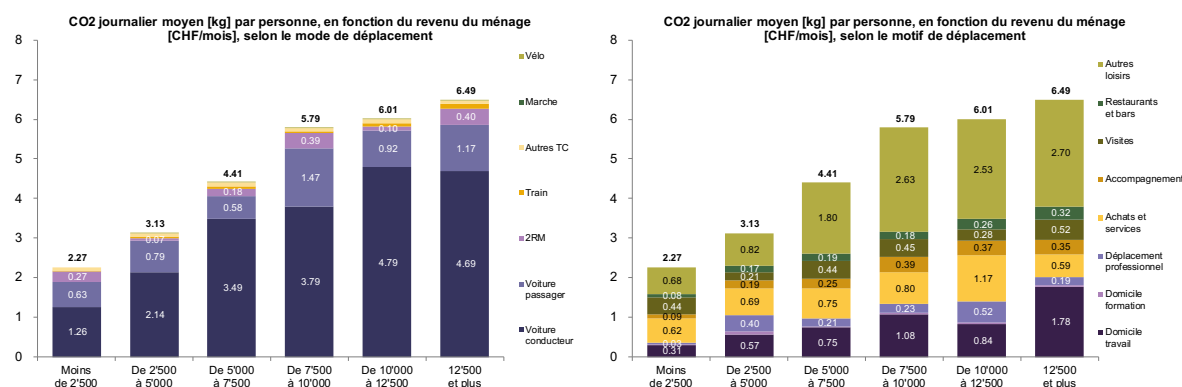


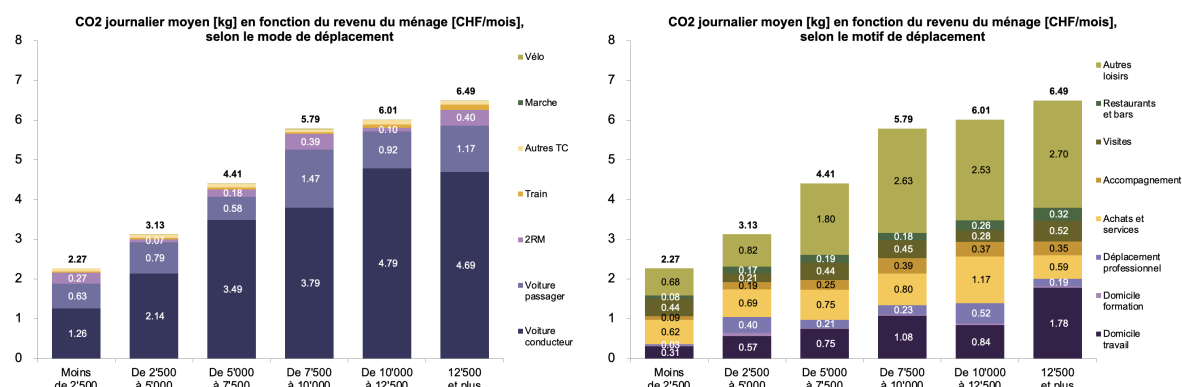
Figure 8. Impact environnemental de la mobilité à Genève en fonction du revenu par mode de déplacement (à gauche) et par motif (à droite)

Pour cette étude, il est nécessaire de disposer d'un **modèle rendant compte de l'influence des modes d'habitat sur la mobilité, toute chose étant égale par ailleurs**. Cela signifie donc que le modèle doit être pertinent, indépendamment des caractéristiques propres (notamment le revenu) des personnes résidant dans les différents modes d'habitat. **En d'autres termes, il doit refléter l'influence nette du territoire et de sa configuration sur la mobilité indépendamment des caractéristiques des personnes.**

Le revenu étant une caractéristique propre des personnes, qui n'est pas déterminée par leur lieu de vie ou plus spécifiquement pour cette étude, leur mode d'habitat. Ainsi, pour être à même de rendre compte de l'effet net de chacun des facteurs territoriaux sur les pratiques de mobilité du point de leur impact environnemental, **il est nécessaire de « maîtriser » l'effet du revenu**, pour s'assurer que l'effet provient bel et bien de déterminants de l'aménagement du territoire et non du revenu.

L'influence du revenu

Finalement, conformément à ce qui a été dit précédemment, la littérature souligne à quel point le revenu, ou plus globalement le pouvoir d'achat, est souvent corrélé à l'intensité de la mobilité des personnes. Ci-dessus, on observe bien une tendance confirmant ces conclusions, avec un impact journalier qui est presque multiplié par 3 entre la classe de revenu la plus faible et celle la plus élevée. Dans le détail, s'agissant des seuls motifs de loisirs, ceux-ci sont effectivement multipliés par 3 entre les 2 classes extrêmes, tandis que d'autres motifs, comme les achats et services contraints par le ménage, auront tendance à stagner entre les différentes classes de revenu.



Comme observé ci-dessus, le revenu influence de manière très marquée l'impact environnemental global induit par la mobilité des personnes. Cela étant, le revenu est une caractéristique propre des personnes, qui n'est pas déterminée par leur lieu de vie ou plus spécifiquement pour cette étude, leur

mode d'habitat. Pour autant, il est important de relever le fait que le revenu est corrélé¹⁸ aux différents facteurs analysés ci-dessus, comme le montre le tableau ci-dessous.

L'analyse ANCOVA (Analysis of Covariance) est une procédure statistique permettant d'estimer la valeur d'une variable (ici l'impact environnemental de la mobilité) selon une autre variable (chacun des facteurs socioterritoriaux) tout en maîtrisant l'effet d'une troisième variable (le revenu). Grâce à l'échantillon important fourni par le MRMT, il est donc possible de déterminer, pour chacun des facteurs socioterritoriaux, leur effet net. L'intérêt de cette procédure est de permettre d'identifier les facteurs les plus pertinents à retenir pour l'élaboration du modèle dans la partie suivante. En effet, ceux dont l'effet est trop faible ou inexistant seront ignorés dans le modèle.

Les graphiques suivants présentent l'impact environnemental en fonction de chacun des quatre facteurs socioterritoriaux pour lesquels l'analyse ANCOVA confirme une influence significative sur l'impact environnemental, une fois l'effet « revenu » maîtrisé. Ces quatre facteurs sont :

- Le niveau de qualité de desserte
- L'accessibilité en transport en commun
- La densité humaine
- Le régime de stationnement

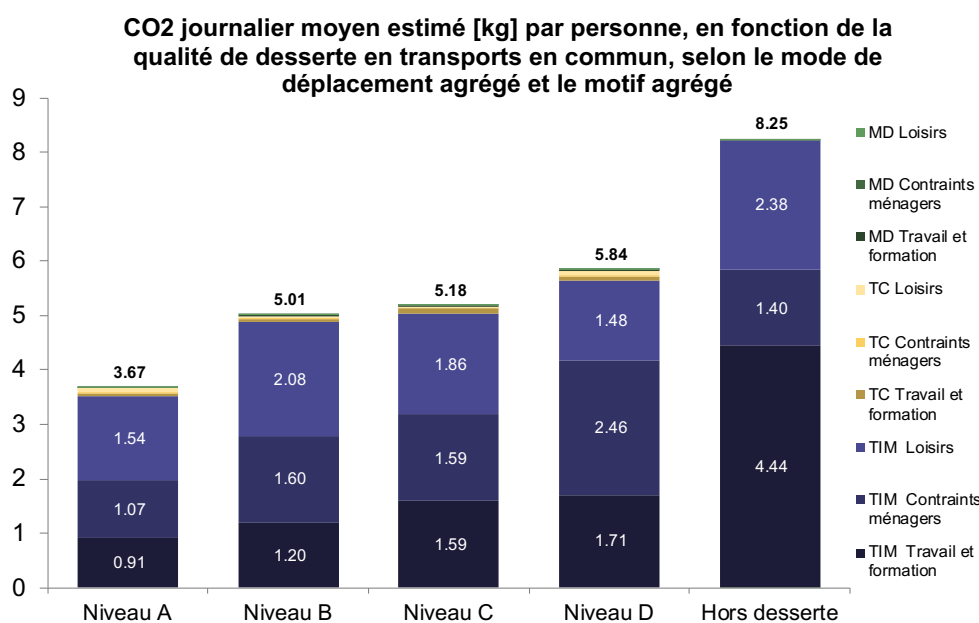


Figure 9. Estimation de l'impact CO₂ journalier moyen en fonction de l'effet net du niveau de qualité de desserte TC du lieu de résidence¹⁹, selon les modes et les motifs agrégés

En ayant pris soin de maîtriser l'effet du revenu, on constate que l'influence de la qualité de desserte en TC est notable²⁰, et cette relation est statistiquement significative. En effet, si l'on considère par exemple les niveaux B et C, la différence observée entre les deux n'est pas statistiquement significative. En revanche, il y a bien une tendance générale, qui elle est significative. À ce stade, on considère donc que, l'effet du revenu maîtrisé, **la qualité de desserte en TC a un effet net statistiquement significatif** et qu'il est donc pertinent de conserver ce facteur dans l'élaboration du modèle²¹.

¹⁸ La corrélation n'exprime pas ici un lien de cause à effet, mais plutôt une détermination commune en amont.

¹⁹ Voir chapitre 4.3 pour la définition du niveau de qualité de desserte en TC.

²⁰ Si l'on se réfère au chapitre 11.1 en annexe, on constate qu'il est nécessaire de maîtriser l'effet du revenu pour identifier l'effet net de la qualité de desserte, le revenu ayant tendance à renforcer l'effet net.

²¹ Voir chapitre 11.2 pour la description détaillée du modèle et son élaboration.

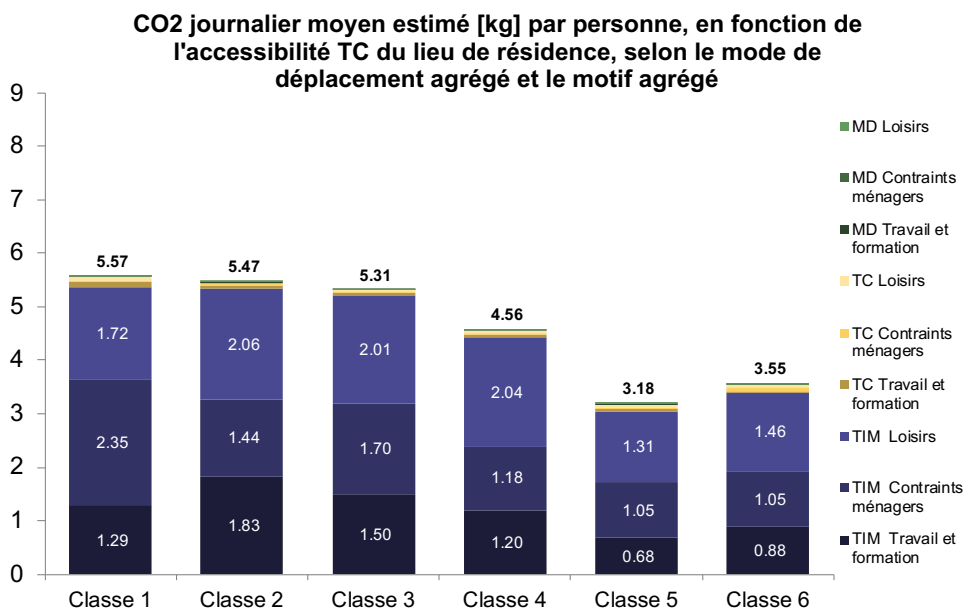


Figure 10. Estimation de l'impact journalier moyen en fonction de l'effet net de l'accessibilité TC²² du lieu de résidence, selon les modes et les motifs agrégés

S'agissant de l'accessibilité TC du lieu de résidence, on observe là aussi une tendance générale similaire à ce qui a été observé précédemment, et la relation nette est donc statistiquement significative. Pour autant, les différences entre les classes 1 à 3 sont cette fois-ci bien moins marquées qu'elles ne l'étaient sans la prise en compte du revenu (voir graphique correspondant à l'annexe 3). Ainsi, on peut considérer que **dans ces territoires (les zones peu denses et mal desservies en TC), les différences de revenu entre les résidents participaient grandement de la variabilité des comportements de mobilité.**

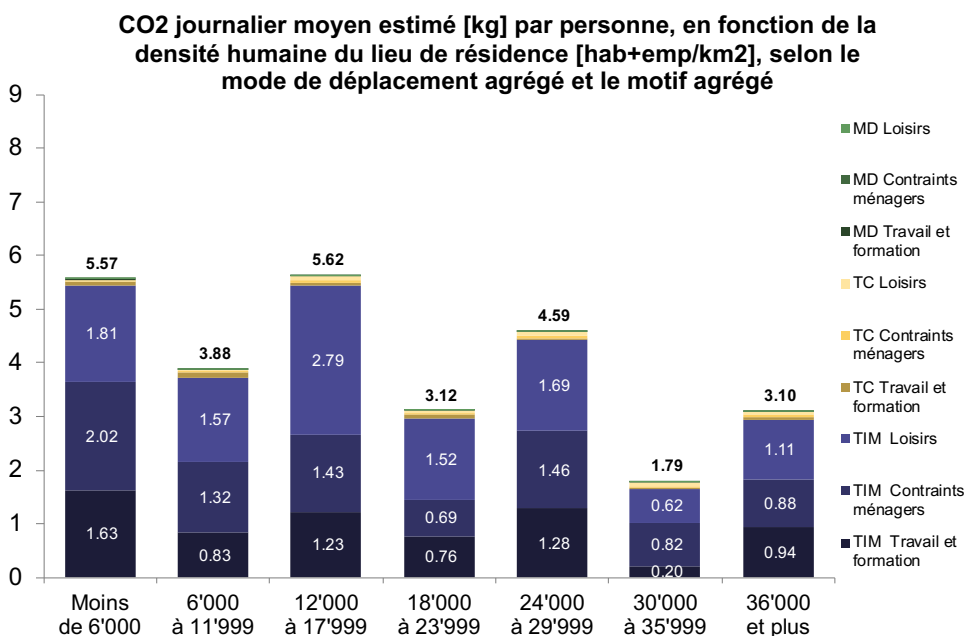


Figure 11. Estimation de l'impact journalier moyen en fonction de l'effet net de la densité humaine du lieu de résidence, selon les modes et les motifs agrégés

²² L'indice d'accessibilité est ici mis en classe, pour autant, il est conservé comme une variable continue dans le modèle. Les classes d'accessibilité utilisées ici sont les suivantes : classe 1 : 0 à 7'000, classe 2 : 7'001 à 11'000, classe 3 : 11'001 à 17'000, classe 4 : 17'001 à 28'000, classe 5 : 28'001 à 38'000, classe : 38'000 et plus

Comme pour la qualité de desserte en TC, on observe une relation tendancielle linéaire, avec une réduction de l'impact environnemental à mesure que l'accessibilité TC augmente. Pour autant, la croissance de l'impact entre la classe 5 et la classe 6 requiert d'être attentif à l'effet qu'aura ce facteur dans le modèle.

La relation nette entre la densité humaine du lieu de résidence et l'impact environnemental de la mobilité se révèle être également significative d'un point de vue statistique. Cependant, bien que l'on observe **une tendance linéaire que l'on peut traduire par une réduction de l'impact à mesure que la densité augmente**, on constate également une grande variabilité entre les classes, notamment la classe de 12'000 et à 17'999, celle de 24'000 à 29'999 ainsi que celle de 36'000 et plus.

Comme pour l'accessibilité TC, cette variabilité entre les classes requiert une attention particulière lors de l'élaboration du modèle dans la partie suivante.

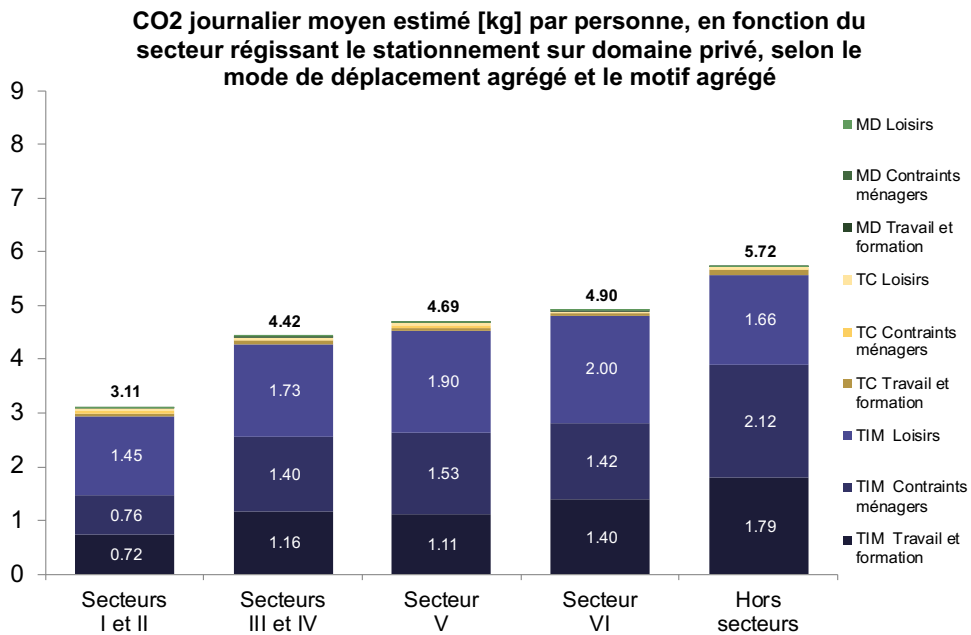


Figure 12. Estimation de l'impact journalier moyen en fonction de l'effet net du régime de stationnement du lieu de résidence, selon les modes et les motifs agrégés

Finalement, de manière similaire à ce qui est observé s'agissant de la qualité de desserte en TC, l'influence du secteur de régime de stationnement dans lequel se situe le lieu de résidence met en lumière une relation statistiquement significative vis-à-vis de l'impact environnemental de la mobilité. En effet, comme on l'observe **l'effet net de la contrainte de stationnement s'accompagne d'une réduction de l'impact environnemental, en particulier s'agissant des TIM**. Ainsi, il semble une fois encore pertinent d'intégrer ce facteur socioterritorial dans le modèle.

5 Analyse environnementale basée sur l'Analyse de Cycle de Vie

L'impact environnemental des modes d'habitat est représenté à l'aide de l'indicateur de réchauffement climatique (en kg de CO₂-équivalent par personne par an).

5.1 Analyse des contributions du logement et de la mobilité

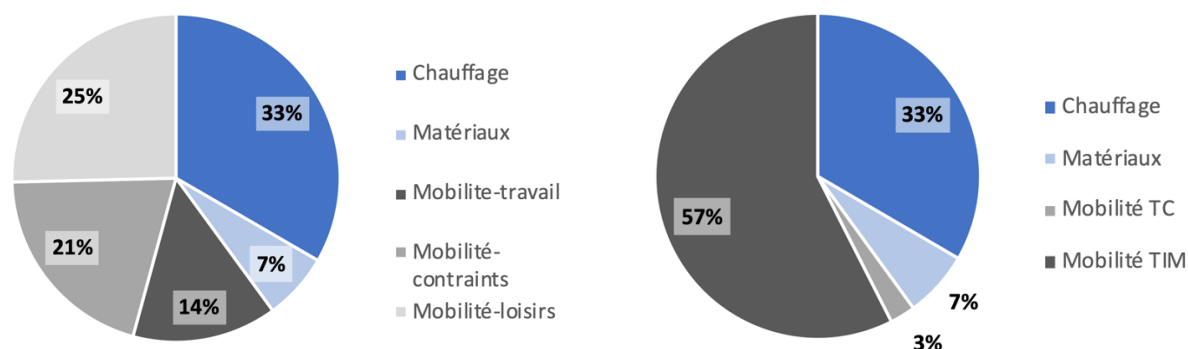


Figure 13. Répartition moyenne des sources d'émissions de GES pour l'ensemble des modes d'habitat (mobilité détaillée par motif à gauche et par mode à droite)

	Log. Chauffage	Log. Matériaux	Mob. TIM	Mob. TC	Mob.-travail	Mob.-constraints	Mob.-loisirs	Logement	Mobilité
% Minimum	11%	3%	38%	1%	10%	14%	18%	19%	43%
% Moyen	33%	7%	57%	3%	14%	21%	25%	40%	60%
% Maximum	51%	10%	78%	5%	19%	28%	34%	57%	81%

Tableau 6. Contribution respective des différentes sources d'émissions de GES pour l'ensemble des modes d'habitat

L'impact environnemental des modes d'habitat analysés est dominé par la mobilité (en moyenne 60%²⁴). C'est le mode « transport individuel motorisé » qui en est largement la cause (57%) et, en matière de motif de déplacement, les loisirs (25%). Plus spécifiquement, le poids du volet mobilité s'étend de 81% dans le cas du mode d'habitat I (Les Vergers) à 43% dans le cas du mode d'habitat B (Eaux-Vives). L'usage de la voiture constitue entre 38% pour mode d'habitat K (Nant d'Argent) à 78% dans le cas du mode d'habitat O (Poisy). Le poids respectif des trois catégories de motifs de déplacement est relativement homogène.

Les modes d'habitat pour lesquels l'impact de la mobilité est le plus réduit sont ceux disposant de bonnes alternatives aux TIM – une qualité de desserte et une accessibilité élevée pour les TC – ainsi que de mesures contraignant leur usage : un stationnement voiture réduit. Ajoutons encore que l'augmentation de la densité participe d'une réduction de l'usage des TIM, permise notamment par une réduction des distances à parcourir et une opportunité donc plus grande pour les deux modes actifs (marche, vélo) qui ont un impact faible ou nul.

L'impact du logement est néanmoins dominant dans certains cas où l'on observe une forte consommation de mazout pour le chauffage (en raison de l'ancienneté du bâti ou d'une grande surface habitée) avec un impact de la mobilité proportionnellement plus faible. C'est le cas des modes d'habitat K (Nant d'Argent), B (Eaux-Vives), E (Carouge) et G (Chêne-Bourg) pour lesquels l'impact du logement s'échelonne entre 57% et 51%.

²⁴ Soit la part des émissions de la mobilité, en moyenne sur l'échantillon des modes d'habitat analysés, et selon le périmètre du « mode d'habitat » tel que défini dans au §3.2 de ce rapport, à savoir uniquement le logement (sans l'électricité) et la mobilité terrestre.

Pour la partie logement, sur l'échantillon de modes d'habitat analysés, le recours aux énergies fossiles (gaz et mazout) pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire constitue une part prépondérante de l'impact - 33% en moyenne - alors que les matériaux de construction ne représentent que 7% en moyenne. Cette part d'impact liée aux matériaux est minime dans le cas de logements anciens (p.ex. 5% pour le mode E (Carouge)) alors que pour les bâtiments récents il peut s'élever à 10% (p.ex. mode F Chapelle). En proportion de l'impact du logement uniquement, les matériaux des bâtiments les plus récents pèsent pour 40% (p.ex. modes I (Vergers) et P (Vernets)) et ce en raison d'une haute performance énergétique combinée avec une part élevée d'énergie renouvelable.

Impact des modes d'habitat (%) (mobilité selon motif)

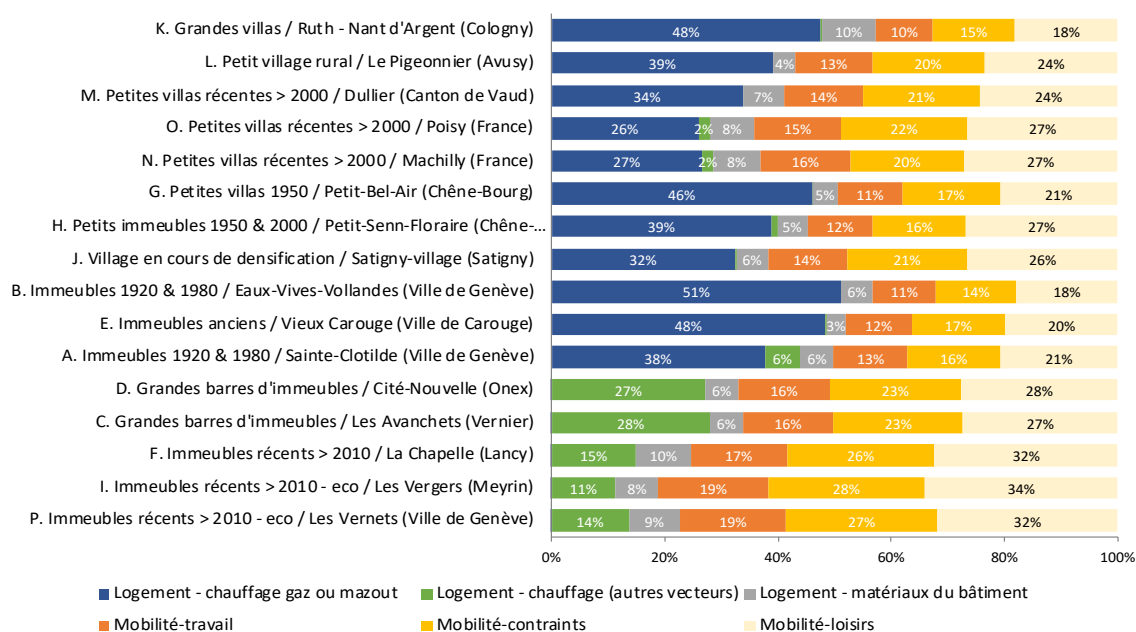


Figure 14. Contribution (en %) du logement et de la mobilité (selon motif de déplacement) aux émissions de GES par personne par an.

Impact des modes d'habitat (%) (mobilité selon mode)

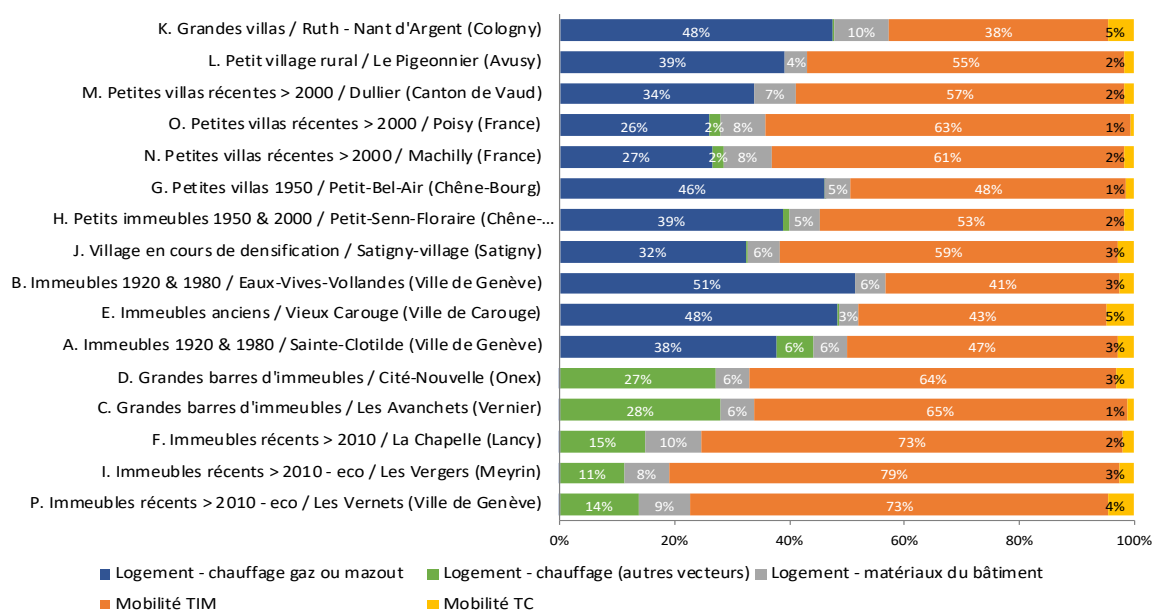


Figure 15. Contribution (en %) du logement et de la mobilité (selon mode de transport) aux émissions de GES par personne par an.

5.2 Comparaison de l'impact environnemental des modes d'habitat

Impact des modes d'habitat (kgCO₂-équ. /pers /an) (mobilité selon motif)

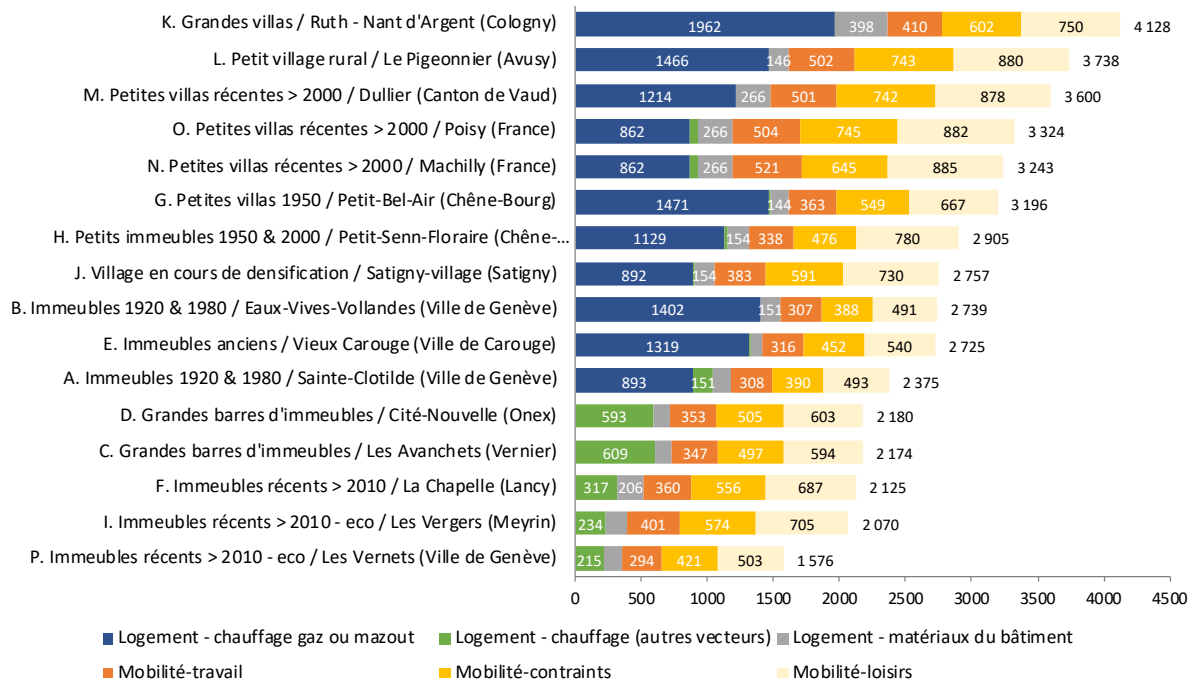


Figure 16. Impact des modes d'habitat (mobilité selon motif de dépl.) (en kg de CO₂-équ. / pers / an).

Impact des modes d'habitat (kgCO₂-équ. /pers /an) (mobilité selon mode)

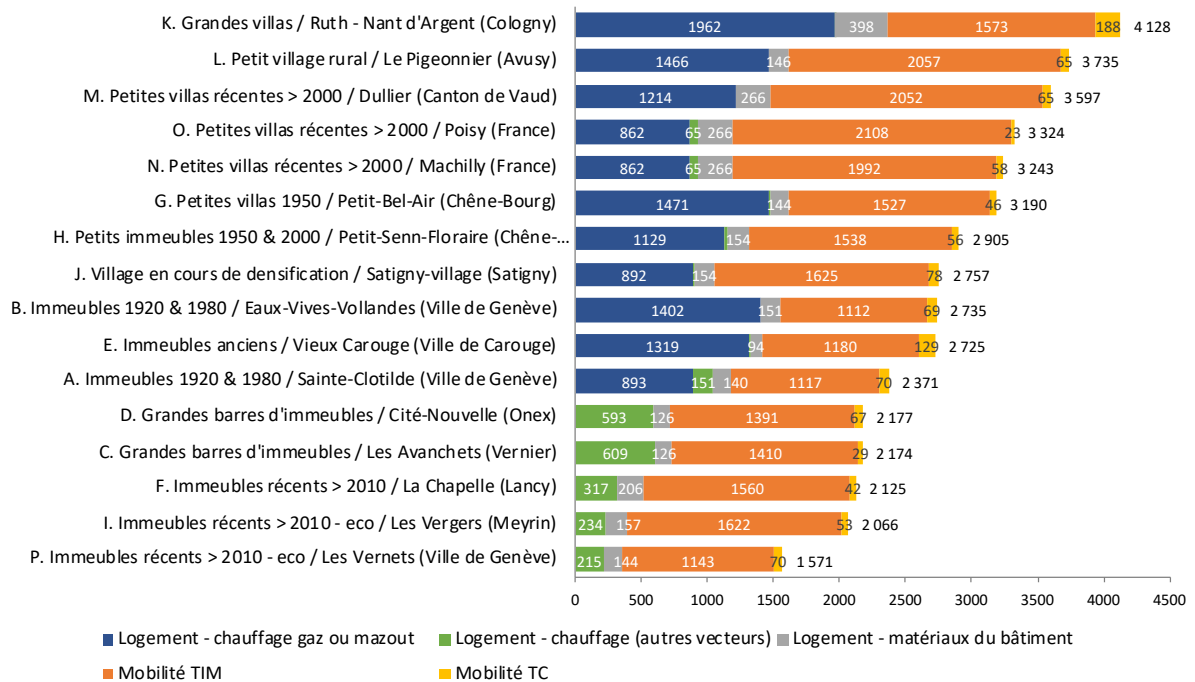


Figure 17. Impact des modes d'habitat (mobilité selon mode de transport) (en kg de CO₂-équ. / pers / an).

Les résultats par mode d'habitat sont présentés²⁵ à la page précédente sous forme de graphiques et en chiffres à l'annexe 1. Comme indiqué ci-dessus, la mobilité en voiture (56% en moyenne) et/ou les énergies fossiles pour le chauffage (33% en moyenne) dominent l'impact environnemental de tous les modes d'habitat. Il existe cependant une différence notable entre ceux-ci.

Le mode d'habitat avec la meilleure performance environnementale est le mode d'habitat P (Vernets) tandis que la moins bonne performance peut être observée pour le mode habitat K (Nant d'Argent), qui est 2.6 fois plus élevée.

La bonne performance du mode d'habitat P (Vernets) de 1.6 tonne de CO₂-équivalent par personne par an s'explique principalement par une part élevée d'énergie non-fossile (raccordement au CAD), une surface habitée faible (25-30 m²/pers) dans des immeubles récents avec un standard énergétique élevé (IDC : 200 MJ/m²), une centralité et une bonne desserte en transport publics qui réduit les distances et le recours à la voiture.

La mauvaise performance du mode d'habitat K (Nant d'Argent) de 4.1 tonnes de CO₂-équivalent par personne par an est expliquée par une utilisation importante de mazout pour le chauffage, un IDC relativement élevé (437 MJ/m²) et la surface habitée par personne la plus élevée (69 m²) de l'échantillon. Elle est aussi expliquée par une performance moyenne à faible en termes de mobilité.

Outre ces deux résultats situés aux extrêmes et qui se démarquent clairement, les résultats de performance intermédiaires peuvent être regroupés ainsi :

- **Des modes d'habitat à impact environnemental faible (émissions : 2 - 2.4 tonnes de CO₂-équivalent par personne par an)** caractérisés principalement par le recours à un chauffage au moins en partie alimenté par des énergies renouvelables. Les plus performants en la matière sont péjorés par un résultat médiocre en ce qui concerne la mobilité ou inversement. Typiquement, le mode d'habitat I (Vergers) a un excellent résultat sur le plan de l'énergie du bâtiment grâce au raccordement au CAD-Vergers mais il présente un impact de la mobilité situé dans moitié supérieure de l'échantillon, ce en raison d'une faible densité alentour, une faible contrainte de stationnement et une accessibilité TC moyenne. En revanche, le mode d'habitat A (Ste-Clothilde) recourt encore majoritairement à un chauffage au gaz²⁶, mais son résultat de mobilité est un des meilleurs en raison de sa densité humaine très élevée, de sa très bonne accessibilité TC et d'un régime de stationnement contraignant. Ce groupe inclut également les modes d'habitat F (Chapelle), C (Avanchets) et D (Cité-Nouvelle), ces deux derniers étant raccordés au réseau CADIOM/CAD-SIG (voir Figure 5).
- **Des modes d'habitat à impact environnemental moyen (émissions : 2.7 - 2.9 tonnes de CO₂-équivalent par personne par an)** caractérisés par deux combinaisons. Les modes d'habitat E (Vieux-Carouge) et B (Eaux-Vives) ont un tissu bâti plutôt ancien avec un IDC assez mauvais (env. 440 MJ/m²), un chauffage fossile (mazout et gaz), une surface habitée dans la fourchette haute de la catégorie immeuble (env. 40 m²/pers), « compensés » par une très bonne performance sur le plan de la mobilité. Les modes d'habitat J (Satigny) et H (Petit-Senn) ont un résultat médiocre d'un point de vue mobilité en raison de leur localisation légèrement excentrée dans l'agglomération (desserte et accessibilité TC moyennes ou faible, densité faible et stationnement peu contraint) mais plutôt bon au niveau de l'énergie du bâtiment soit en raison d'une faible surface habitée, soit d'un recours élevé au gaz (qui émet env. 20% moins de CO₂ que le mazout) ou encore d'un IDC relativement bon²⁷.
- **Des modes d'habitat à impact environnemental élevé (émissions : 3.2 - 3.7 tonnes de CO₂-équivalent par personne par an)** caractérisés par une combinaison de plusieurs éléments avec

²⁵ En comparaison avec ceux du rapport de janvier 2020 (qui ne considérait que la mobilité pendulaire, cf. §3.1), ces nouveaux résultats présentent globalement un profil semblable au niveau du classement des différents modes d'habitat entre eux. L'ajout des autres motifs de déplacement renforce néanmoins l'effet de la desserte en transport public : la dépendance à la voiture des modes d'habitats excentrés péjore davantage encore la performance de ces modes par rapport aux résultats initiaux.

²⁶ Jusqu'à l'arrivée prochaine du raccordement de ce quartier à Genilac.

²⁷ Différents paramètres (surface, IDC, %gaz...) dont les hypothèses sont détaillées dans le tableau 3.

un grand impact : une mobilité caractéristique de l'habitat diffus ou périphérique (faible accessibilité TC, faible densité humaine, offre de stationnement élevée), une surface habitée élevée (env. 43 m²/pers) et une consommation d'énergie importante et fossile pour le chauffage. Il s'agit des modes d'habitat G (Petit-Bel-Air), N (Machilly), O (Poisy) et L (Le Pigeonnier).

A titre de comparaison, l'OFEV estime que les émissions étaient en 2017 **de 14 t.CO₂-éq/pers/an selon une approche orientée « consommation »**²⁸, c'est-à-dire considérant l'ensemble des émissions induites par une personne durant une année pour satisfaire son mode de vie, où que celles-ci aient lieu dans le monde. Selon le plan climat cantonal genevois²⁹, chaque habitant-e du canton de Genève émet en moyenne environ 10 tCO₂e / an (valeur 2018). La trajectoire vise une réduction de -65% en 2030 (à savoir 3,5 tCO₂e/hab/an) et -90% en 2050 (à savoir environ 1 tCO₂e/hab/an).

	Logement (kg CO ₂ -e/an)		Mobilité (kg CO ₂ -e/an)		selon Motifs			Logement kg CO ₂ -e/an	Mobilité kg CO ₂ -e/an	Total kg CO ₂ -e/an
	Chauffage	Matériaux	selon Modes		travail	contraints	loisirs			
			TIM	TC						
Minimum	215	94	1112	23	294	388	491	359	1186	1576
Maximum	1968	398	2108	188	521	745	885	2366	2131	4128
Moyenne	985	184	1563	69	388	555	692	1168	1634	2803
Médiane	986	153	1549	65	362	552	696	1193	1602	2757
max/min	9.2	4.2	1.9	8.1	1.8	1.9	1.8	6.6	1.8	2.6

Tableau 7. Dispersion des valeurs et écart de performance des modes d'habitat pour chaque paramètre d'impact environnemental.

Le tableau 7 met en évidence la dispersion des valeurs autour de la moyenne ainsi que l'écart entre les valeurs minimales et maximales pour chaque paramètre. On observe ainsi que c'est le logement qui présente de plus grand écart (facteur 6.6) alors que la mobilité ne varie que d'un facteur 1.8. Cette observation est directement liée à l'écart entre le ratio d'émission du chauffage à mazout et celui d'un chauffage renouvelable.

En comparaison, l'influence du facteur mobilité sur l'impact des modes d'habitat est moindre dans la mesure où une part des besoins de mobilité globaux est la même où que l'on habite. Par ailleurs - et bien que cette dimension prospective n'ait pas été explorée dans cette étude - notons qu'en cas de transformation du parc de voitures à essence à des véhicules électriques, le facteur de réduction est bien moindre que dans le cas du chauffage en raison de l'importance des émissions liées à la fabrication (énergie grise) et des potentiels changements de comportement induit par la mobilité électrique³². **On peut en déduire qu'aujourd'hui c'est bien l'urbanisme compact et la suppression du chauffage fossile qui constituent les leviers les plus efficaces pour réduire l'impact de l'habitat.**

Facteurs-clés de performance pour le volet logement

Les différences d'impact pour le logement s'expliquent principalement par trois facteurs :

- La surface habitée par personne
- La consommation énergétique par mètre carré de surface habitée (efficacité)
- Le vecteur énergétique pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (fossile ou renouvelable)

La consommation énergétique par personne varie d'un facteur trois entre les modes d'habitat, tandis que l'impact entre vecteurs énergétiques varie, en moyenne dans ce rapport, d'un facteur quatre.

Les facteurs connus qui influencent concrètement cette performance environnementale sont notamment :

- La législation et la réglementation : la réglementation énergétique et les standards de performances minimaux, les régimes de logements contrôlés (contrôle des taux d'occupation pour les logements

²⁸ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/en-bref.html#-1333200555>

²⁹ Plan climat cantonal 2030 (juin 2021) <https://www.ge.ch/document/plan-climat-cantonal-2030-2e-generation-0>

³² Source : Rolf Frischknecht, Annika Messmer, Philippe Stolz (2018) Aktualisierung Umweltaspekte von Elektroautos.

subventionnés (max. 2 pièces de plus que le nombre d'habitants et surface minimale par pièce), etc.

- Les choix du maître d'ouvrages effectués au moment de la construction/rénovation : surface globale par habitant (respect strict des minima et maxima LGZD, dérogations à la hausse ou à la baisse, surfaces non rentées), choix d'un standard énergétique en-deçà des normes (isolation et % de renouvelable).
- Les comportements et choix des habitants : température de confort (chauffage, aération) influant sur l'IDC réel, taille et nombre de personnes par logement (pour les logements non-contrôlés et dans la mesure où le revenu offre cette flexibilité) influant sur la surface considérée par personne, etc.

Facteurs-clés de performance pour le volet mobilité

Ci-dessous, sont présentées les valeurs estimées d'impact environnemental journalier moyen selon les caractéristiques du lieu de résidence.

Modes d'habitat	Qualité de desserte TC	Accessibilité TC	Densité humaine	Régime de stationnement	Impact journalier moyen estimé
B. Immeubles 1920 & 1980 / Eaux-Vives-Vollandes (Ville GE)	Niveau A	Classe 6	36000 et plus	Secteur II	3.25
A. Immeubles 1920 & 1980 / Sainte-Clotilde (Ville de Genève)	Niveau A	Classe 6	36000 et plus	Secteur II	3.26
P. Immeubles récents > 2010 – eco / Les Vernets (Ville GE)	Niveau A	Classe 6	24000 à 29999	Secteur II	3.33
E. Immeubles anciens / Vieux Carouge (Ville de Carouge)	Niveau A	Classe 5	24000 à 29999	Secteur II	3.59
C. Grandes barres d'immeubles / Les Avanchets (Vernier)	Niveau A	Classe 5	24000 à 29999	Secteur IV	3.94
D. Grandes barres d'immeubles / Cité-Nouvelle (Onex)	Niveau A	Classe 4	24000 à 29999	Secteur IV	4.00
G. Petites villas 1950 / Petit-Bel-Air (Chêne-Bourg)	Niveau A	Classe 4	6000 à 11999	Secteur III	4.33
H. Petits immeubles 1950 & 2000 / Petit-Senn-Floraire (Chêne-Bourg)	Niveau A	Classe 4	12000 à 17999	Secteur V	4.37
F. Immeubles récents > 2010 / La Chapelle (Lancy)	Niveau B	Classe 5	6000 à 11999	Secteur III	4.39
I. Immeubles récents > 2010 – eco / Les Vergers (Meyrin)	Niveau A	Classe 3	Moins de 6000	Secteur V	4.60
J. Village en cours de densification / Satigny-village (Satigny)	Niveau B	Classe 2	6000 à 11999	Secteur IV	4.67
K. Grandes villas / Ruth – Nant d'Argent (Cologny)	Niveau B	Classe 1	Moins de 6000	Secteur IV	4.83
N. Petites villas récentes > 2000 / Machilly (France)	Niveau C	Classe 1	Moins de 6000	Hors secteur	5.62
M. Petites villas récentes > 2000 / Dullier (Canton de Vaud)	Niveau D	Classe 1	Moins de 6000	Hors secteur	5.81
L. Petit village rural / Le Pigeonnier (Avusy)	Niveau D	Classe 1	Moins de 6000	Hors secteur	5.82
O. Petites villas récentes > 2000 / Poisy (France)	Niveau D	Classe 1	Moins de 6000	Hors secteur	5.84

Tableau 8. Impact journalier moyen estimé lié à la mobilité selon le modèle, sur la base des caractéristiques socioterritoriales des différents modes d'habitat [kg équi. CO2 par personne pas jour]

Conformément aux hypothèses effectuées en amont, on constate que l'impact journalier de la mobilité des personnes résidentes sera d'autant plus faible que l'offre TC est bonne, la densité est élevée et le stationnement voiture est contraint. Le rapport entre le mode d'habitat le plus performant et le moins bon est de l'ordre d'un facteur 2.

Ainsi, ce sont les zones villas qui présentent l'impact environnemental le plus important. Notons toutefois que s'agissant de la zone villas proche du CEVA, à Machilly (N), le niveau de qualité de desserte meilleur que les 3 autres zones villas permet de réduire un peu l'impact environnemental.

À l'autre bout du spectre, on retrouve des modes d'habitat disposant d'une position centrale au sein de l'agglomération du Grand Genève, à en juger par leur accessibilité TC. À cela s'ajoute une très bonne qualité de desserte TC ainsi que des densités humaines élevées, couplées à un régime de

stationnement contraignant. Ces facteurs favorisant une mobilité de courte distance plutôt orientée vers les modes doux et collectifs, il en ressort un impact très réduit.

De manière plus détaillée, il est intéressant de relever l'impact du mode d'habitat de l'écoquartier des Vergers (I), qui se situe dans la moitié supérieure de la distribution. Il est près de 1.5 fois plus élevé que celui du mode Eaux-Vives-Vollandes par exemple. Consécutivement à ce qui a déjà été dit précédemment sur l'impact de la forme bâtie, on observe que celle-ci ne garantit pas un impact réduit de la mobilité, mais que ce sont bien d'autres déterminants territoriaux qui vont jouer un rôle. Dans le cas de ce mode d'habitat, la faible densité alentour, la faible contrainte de stationnement, l'accessibilité TC moyenne et la distance au centre de l'agglomération traduisent une dépendance à la voiture.

De manière à obtenir une analyse plus détaillée de la composition de l'impact environnemental, une distinction par mode de déplacement et par motif de déplacement a été appliquée. Pour ce faire, la méthode s'est basée sur l'impact global estimé par le modèle, sur lequel a ensuite été appliquée une clé de répartition basée sur la répartition moyenne par modes et par motifs dans le MRMT en maîtrisant l'effet du revenu. Ainsi, selon les valeurs de chacun des facteurs, une clé de répartition est appliquée à chaque mode d'habitat.

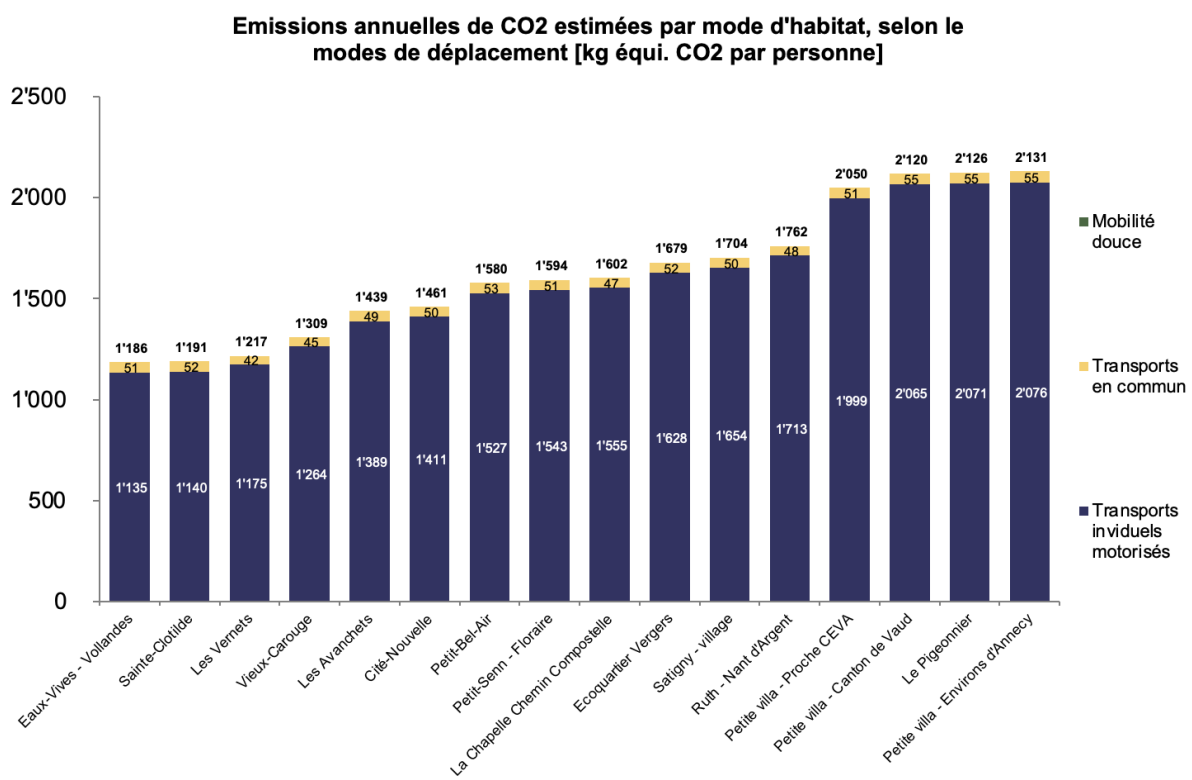


Figure 18. Émissions annuelles de CO2 [kg/pers] estimées par le modèle, selon le mode de déplacement

Ci-dessus, on observe que les transports individuels motorisés, avec en premier lieu la voiture, sont responsable de la majeure partie de l'impact de la mobilité.

S'agissant des transports en commun, il est intéressant de noter que ceux-ci ont un impact très similaire entre les différents modes d'habitat, qui n'est donc pas proportionnel à l'impact global, contrairement à celui des TIM. Pour l'expliquer, on peut légitimement faire l'hypothèse que pour les modes d'habitat dont l'impact est le plus faible, les TC sont utilisés régulièrement pour des déplacements de courte distance. Inversement, pour les modes d'habitat dont l'impact est le plus élevé, les TC sont utilisés moins souvent, mais pour des distances plus grandes, notamment du fait que ces personnes sont situées à une plus grande distance des centres. Cette double composante de l'impact environnemental des TC permet ainsi d'expliquer une valeur stable entre les modes d'habitat, bien que cela recouvre des comportements différents.

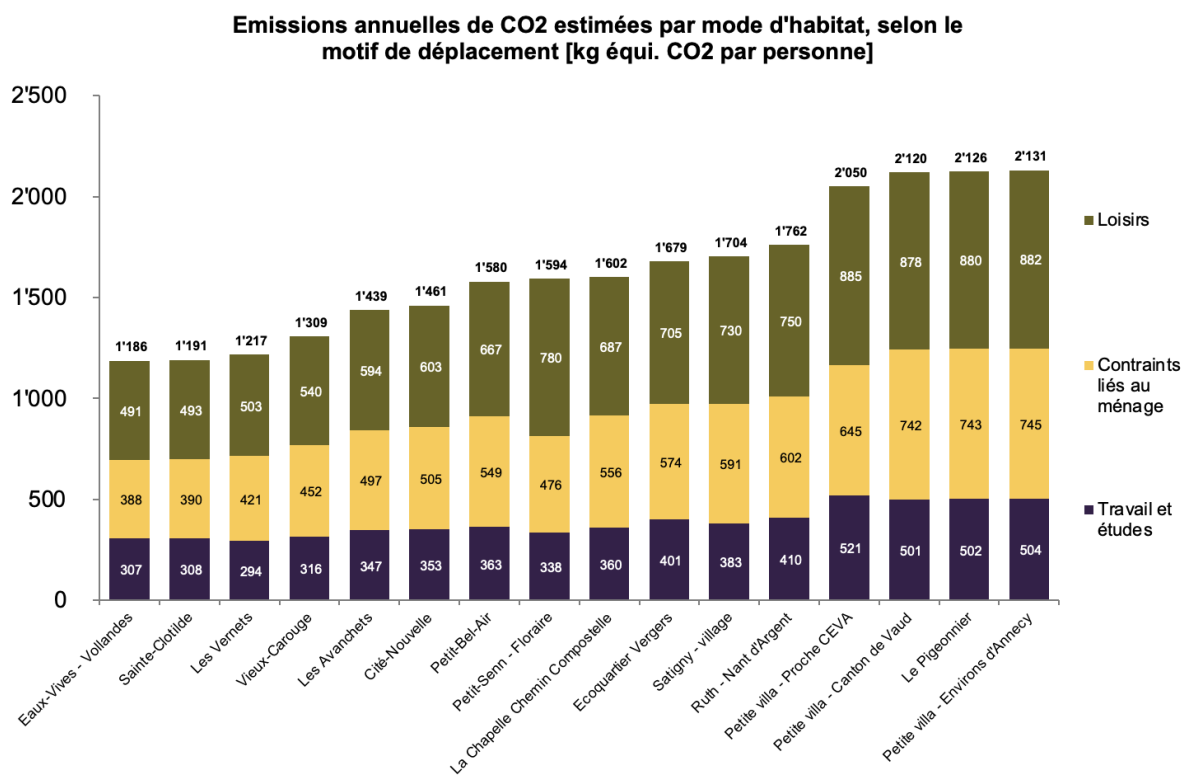


Figure 19. Émissions annuelles de CO2 [kg/pers] estimées par le modèle, selon le motif de déplacement

Le graphique ci-dessus montre que l'impact de chacun des motifs croît de manière proportionnelle, et participe donc toujours de manière équivalente à l'impact global. Sachant que l'effet de revenu a été préalablement maîtrisé pour établir cette répartition, il apparaît que les facteurs socioterritoriaux n'influencent pas sur la répartition du budget mobilité entre les différents motifs. Ce seront donc plutôt les caractéristiques individuelles des personnes qui vont influencer cette répartition. Notamment, l'augmentation du revenu va participer d'une croissance de la part du budget mobilité dédiée aux loisirs par exemple³³.

6 Limites de l'étude

Ce rapport présente une évaluation basée sur les données disponibles dans les statistiques et la littérature, complétées avec quelques données obtenues à partir de bâtiments spécifiques. Les résultats sont conformes aux attentes mais certaines limites sont à relever.

6.1 Le logement

Les données de **surfaces** et d'**IDC** ont été obtenues en partie à partir des sous-périmètres statistiques (SITG), en partie à partir de données effectives obtenues sur des cas d'étude (p.ex. Vergers) ou de modélisation (p.ex. Les Vernets). La fiabilité des données des sous périmètres statistiques est inégale. Or, comme mentionné au chapitre 4.2, ces surfaces influencent grandement le résultat final. Les résultats pour les modes d'habitat J (Satigny-Village) et H (Petit-Senn) laissent à penser qu'un biais statistique pourrait être présent (surfaces calculées trop faibles). L'IDC est, de plus, mal renseigné au niveau des villas. Cependant, celui-ci restant dans l'ordre de grandeur établi au niveau de la Suisse/Genève, il est fait l'hypothèse que la marge d'erreur est relativement faible. Les données de surface par habitant à disposition pour l'évaluation des modes I (Vergers), F (Chapelle) et P (Vernets) sont également par ailleurs basées sur des approximations compte tenu des données disponibles (voir Annexe 2).

³³ Partie 4.3

La modélisation de l'impact des **matériaux** est basée sur une approximation pour les dix modes d'habitat basés sur les sous-secteurs statistiques (bâti ancien). Cette approximation est cependant tout à fait acceptable car conforme aux données de la littérature qui montre l'impact limité de ceux-ci selon une perspective cycle de vie. La modélisation plus précise basée sur les cas d'étude confirme également ce fait puisqu'il est conforme aux résultats de la littérature. Pour les bâtiments récents, le poids de l'impact environnemental du bâti augmente vis à vis de la phase exploitation (chauffage). Si le niveau de détail de l'analyse réalisée dans cette étude est suffisant dans une logique de comparaison de performance, il devrait être approfondi pour obtenir des résultats fins à l'échelle de chaque projet. La prise en compte de l'isolation et de l'équipement pourrait être améliorée. La décision de prendre en compte la moitié des émissions pour un bâtiment ancien par rapport à un bâtiment récent de type HQE est simplement calculé sur les différentiels de consommation constatés par m² de plancher (différence entre les IDC).

De plus, d'autres facteurs permettant de différencier l'estimation par type de bâtiment pourraient également être pris en compte, comme les types de toit. Leur influence sur les résultats semble cependant suffisamment faible pour qu'il ait été décidé de ne pas les considérer ici puisqu'ils ne semblent pas influencer le message de ce rapport.

6.2 La mobilité

La modélisation développée pour évaluer la mobilité des modes d'habitat présente une bonne efficacité dans sa capacité explicative de l'impact environnemental, du point de vue des caractéristiques socioterritoriales du lieu de résidence des personnes. La lecture des résultats fournit des enseignements cohérents avec d'autres observations relevées dans la littérature scientifique.

Le modèle établi comporte cependant, comme tout modèle, certaines limites, essentiellement liées à la manière dont il est conçu, et la problématique à laquelle il répond. En effet, conformément à l'approche relative à l'étude globale sur l'impact environnemental spécifique aux modes d'habitat, un focus a été mis sur les lieux de résidence des personnes, que ce soit leur bâtiment ou plus généralement le territoire alentour de résidence. Cela étant, le modèle rend donc compte de l'impact environnemental d'une personne moyenne vivant dans un lieu de résidence – un mode d'habitat – qui lui, est caractérisé. Mais la personne ne dispose d'aucune autre caractéristique que d'être représentative d'un résident genevois moyen (le modèle se base sur les données genevoises du MRMT).

Or, dans les faits, on sait que les comportements de mobilité des personnes sont fortement dépendants des caractéristiques individuelles des personnes, de leurs équipements, de leur ménage, de leur lieu de travail, etc. En cela, alors que le modèle a permis l'établissement de l'impact environnemental moyen de chacun des modes d'habitat, cela ne signifie pas que c'est impact est celui que l'on observe dans la « réalité ». Car en définitive, l'impact environnemental final sera certes déterminé par le mode d'habitat, tel que défini au travers des différents facteurs territoriaux utilisés dans le modèle, mais également par les caractéristiques individuelles des personnes qui résideront dans le mode concerné. Notamment, comme cela a été montré précédemment, le revenu des personnes aura tendance à faire varier significativement l'impact environnemental final. En d'autres termes, c'est bien l'association des facteurs territoriaux expliqués par le modèle et des facteurs socio-économiques propres aux personnes (que nous n'avons volontairement pas pris en compte) qui aboutiront aux comportements observés sur le terrain.

Par ailleurs, il s'agit encore d'ajouter que le modèle se base sur les comportements de mobilité observés dans le MRMT qui date de 2015. Pour autant, ceux-ci peuvent évoluer, à l'échelle collective, selon les nouvelles modes, de nouveaux règlements, l'émergence de nouveaux équipements, etc. Pour renforcer la capacité prospective du modèle, il conviendrait donc d'intégrer ce genre d'éléments, sous la forme d'hypothèses et d'éléments de calibrage.

7 Conclusion et perspectives

Cette étude pose les bases méthodologiques permettant d'évaluer l'impact environnemental d'une sélection de modes d'habitat de l'agglomération du Grand Genève. Les résultats permettent de quantifier sous forme d'empreinte carbone les facteurs déterminants de l'impact environnemental de différents modes d'habitat. **Ces données scientifiques, qui étaient cruellement manquantes à ce jour, permettent d'apporter de précieux éléments de réponses à des questions et enjeux majeurs en matière d'aménagement du territoire : comment pouvons-nous penser et configurer le territoire et les modes d'habitat pour qu'ils puissent stimuler au mieux des comportements vertueux en matière de consommation énergétique et donc de transition écologique et ceci indépendamment des comportements individuels ?**

Notre étude fournit des réponses sans équivoque en réponse à ces enjeux : **ce sont principalement la surface habitée par personne, le recours à un chauffage fossile et l'usage important de la voiture thermique sur de grandes distances qui creusent l'écart de performance entre les modes d'habitat analysés.** L'impact environnemental des modes d'habitat (selon le périmètre et l'échantillon retenu pour la présente étude) est dominé par la mobilité (en moyenne 60%). C'est le transport individuel motorisé qui en est largement la cause (57%) et, en matière de motif de déplacement, les loisirs (25%). Pour la partie logement, le recours aux énergies fossiles (gaz et mazout) pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire constitue une part prépondérante de l'impact - 33% en moyenne - alors que les matériaux de construction ne représentent que 7% en moyenne. Si cette part d'impact liée aux matériaux est minime dans le cas de logements anciens, la situation est cependant différente pour les immeubles plus récents (mieux isolés) et les immeubles dont le chauffage n'est pas basé sur l'énergie fossile.

Les modes d'habitat peuvent être classés en quatre groupes dont les deux extrêmes diffèrent d'un facteur 2.6 (1.6 tonnes versus 4.1 tonnes de CO₂-équ. par personne par an) :

- **le mode d'habitat P (Vernets)** caractérisé par une part élevée d'énergie non-fossile (raccordement au CAD), une surface habitée en dessous de la moyenne (25-30 m²/pers) dans des immeubles récents avec un standard énergétique élevé (IDC : 200 MJ/m²) ainsi qu'une centralité liés à une bonne desserte en transport publics qui réduit les distances et le recours à la voiture.
- **le mode d'habitat K (Nant d'Argent)** caractérisé par une utilisation importante de mazout pour le chauffage, un IDC relativement élevé (437 MJ/m²) et la surface habitée par personne la plus élevée de l'échantillon (69 m²). Elle est aussi expliquée par une performance moyenne à faible en termes de mobilité.

D'un point de vue méthodologique, **le logement et la mobilité sont considérés de manière adéquate.** Certaines données, peu robustes, demanderaient cependant un approfondissement (p. ex. les surfaces par habitant ou les IDC des zones villas).

7.1 Perspectives

Les résultats fournis dans cette étude représentent une première étape riche d'enseignements et qui démontre la pertinence d'utiliser l'outil d'Analyse de Cycle de Vie pour comparer l'impact environnemental de différents modes d'habitat.

La méthodologie proposée dans ce rapport ouvre les perspectives intéressantes suivantes :

- L'application de la méthode à des cas spécifiques **d'aide à la décision** pour prendre en compte les objectifs climatiques dans les planifications territoriales **dans une logique de budget carbone** – et répondre ainsi par exemple à cette question : *quelle densité requise ou quel taux de report modal minimal dans un nouveau quartier des Cherpines pour atteindre les cibles du plan climat cantonal, respectivement la société à 2000 W ?*
- L'élargissement de l'analyse des modes d'habitat à **l'ensemble de l'agglomération du Grand Genève** (par quartiers ou communes), ce qui permettrait d'avoir une cartographie de la répartition des modes d'habitat à l'échelle cantonale en fonction de leur impact environnemental et d'évaluer l'effet d'évolutions à venir (Genilac, Léman Express) sur l'empreinte carbone des quartiers
- La modélisation développée pour effectuer l'ACV de bâtiments réels mériterait d'être valorisée pour **vulgariser l'impact des choix architecturaux en termes de choix de matériaux ou**

énergétiques. En effet, bien qu'il existe plusieurs instruments à l'intention des maîtres d'ouvrage tels que les eco-devis et les données des écobilans (plateforme eco-bau)³⁴, des recueils de bonnes pratiques (plateforme "Bilan carbone chantier et bâtiment")³⁵, ainsi que des outils de modélisation (tels que Eco-Bat), il n'existe pas à ce jour de document public offrant une comparaison synthétique entre les impacts des différents types de bâtiments³⁶.

- Le **modèle statistique mis en place pour la mobilité permet de déterminer**, en fonction des données du MRMT 2015, la probabilité qu'une personne habitant dans un quartier aux caractéristiques x ou y développe tel ou tel comportement de mobilité. Ce modèle évolutif – dont la précision peut être améliorée en l'enrichissant avec des données d'enquête de quartier offre une bonne base pour modéliser les comportements de mobilité des futurs quartiers et planifier les équipements et infrastructures en conséquence. **"Dis-moi à quoi ressemblera ton futur quartier et je te dirai quelle mobilité celui-ci générera demain !"**

En complément à la présente étude – qui n'appréhende l'impact environnemental que sous l'angle du changement climatique (carbone), il est **souhaitable de mieux comprendre si, et comment, les aspects liés à la biodiversité pourraient être intégrés** à l'évaluation des modes d'habitat. Une étude complémentaire au présent rapport est prévue en collaboration avec l'UNIGE.

De plus, **une comparaison avec les études existantes** du canton de Genève, telle que le Bilan Carbone du canton de Genève, serait certainement bénéfique dans une logique d'intégration des méthodes d'analyse aux différentes échelles.

³⁴ www.eco-bau.ch

³⁵ <https://maneco-exp.izypeo.net/login>

³⁶ Des publications récentes de l'EPFL mettent d'ailleurs en évidence le manque d'intégration des outils d'ACV par les maîtres d'ouvrages et les architectes (p.ex. <https://infoscience.epfl.ch/record/271500?ln=en>)

8 Références

6t-bureau de recherche. (2018). Analyse du Microrecensement mobilité et transports 2015 et comparaison avec les années 2000, 2005 et 2010. Phase 1. Rapport final

Département du territoire (2006). Directive pour le calcul de l'indice de dépense de chaleur, Énergétique du bâtiment.

Alig M., Frischknecht R., Krebs L., Ramseier L., Stolz P. (2022) LCA of climate friendly construction materials, Bundesamt für Energie BFE, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich AHB.

Heeren et al. (2015). "Environmental Impacts of Buildings – What Matters?" in Environ. Sci. Technol.

Jolliet et al. (2018). Analyse du cycle de vie. PPUR.

Kaenzig J., Jolliet O. (2006). « Consommation respectueuse de l'environnement : décisions et acteurs clés, modèles de consommation » in Connaissance de l'environnement no 0616. Office fédéral de l'environnement. Berne.

Kaufmann V., Munafo S. (2014). La mobilité des Genevois et des Vaudois, rapport de synthèse. Lausanne EPFL, LaSUR.

KBOB (2016). Recommandation de la KBOB « Données des écobilans dans la construction 2009/1:2016 ».

OCEN (2018). La consommation de chaleur des bâtiments de Genève.

Office cantonal de la statistique (2014). Microrecensement de la mobilité et des transports.

Office fédéral de l'environnement (2013). Ecofacteurs suisses 2013 selon la méthode de la saturation écologique.

Schwab et al. (2016). Rénovation Énergétique. Approche globale pour l'enveloppe du bâtiment.

SuisseEnergie, Office fédéral de l'énergie (OFEN) (2018). L'efficacité énergétique dans les ménages.

Annexes

9 Annexe 1 - tableau de résultats détaillés pour les seize modes d'habitat

#. Nom (Commune)	Logement (kg CO2-e/an)			Mobilité (kg CO2-e/an)					Logement kg CO2-e/an	Mobilité kg CO2-e/an	Total kg CO2-e/an	Facteur
	Chauffage		Bâtiments	selon Modes		selon Motifs						
	Gaz/mazout	Autres	Matériaux	TIM	TC	travail	contraints	loisirs				
P. Immeubles récents > 2010 - eco Les Vernets (Ville de Genève)	0	215	144	1143	70	294	421	503	359	1217	1576	1.0
I. Immeubles récents > 2010 - eco Les Vergers (Meyrin)	0	234	157	1622	53	401	574	705	391	1679	2070	1.3
F. Immeubles récents > 2010 La Chapelle (Lancy)	0	306	206	1560	42	360	556	687	512	1602	2114	1.3
C. Grandes barres d'immeubles Les Avanchets (Vernier)	0	609	126	1410	29	347	497	594	735	1439	2174	1.4
D. Grandes barres d'immeubles Cité-Nouvelle (Onex)	0	593	126	1391	67	353	505	603	719	1461	2180	1.4
A. Immeubles 1920 & 1980 Sainte-Clotilde (Ville de Genève)	893	151	140	1117	70	308	390	493	1184	1191	2375	1.5
E. Immeubles anciens Vieux Carouge (Ville de Carouge)	1319	3	94	1180	129	316	452	540	1416	1309	2725	1.7
B. Immeubles 1920 & 1980 Eaux-Vives-Vollandes (Ville de Genève)	1402	0	151	1112	69	307	388	491	1553	1186	2739	1.7
J. Village en cours de densification Satigny-village (Satigny)	892	7	154	1625	78	383	591	730	1053	1704	2757	1.7
H. Petits immeubles 1950 & 2000 Petit-Senn-Floraire (Chêne-Bourg)	1129	28	154	1538	56	338	476	780	1311	1594	2905	1.8
G. Petites villas 1950 Petit-Bel-Air (Chêne-Bourg)	1471	1	144	1527	46	363	549	667	1616	1580	3196	2.0
N. Petites villas récentes > 2000 Machilly (France)	927	0	266	1992	58	521	645	885	1193	2050	3243	2.1
O. Petites villas récentes > 2000 Poisy (France)	927	0	266	2108	23	504	745	882	1193	2131	3324	2.1
M. Petites villas récentes > 2000 Dullier (Canton de Vaud)	1214	0	266	2052	65	501	742	878	1480	2120	3600	2.3
L. Petit village rural Le Pigeonnier (Avusy)	1466	0	146	2057	65	502	743	880	1612	2126	3738	2.4
K. Grandes villas Ruth - Nant d'Argent (Cologny)	1962	6	398	1573	188	410	602	750	2366	1762	4128	2.6

Tableau 9. Modes d'habitat classés selon leur résultat (en kg de CO2-équivalent par personne par an).

10 Annexe 2. Modélisation du logement

Un état des connaissances sur les impacts environnementaux du logement est tout d'abord présenté. Cette annexe comporte ensuite les informations complémentaires concernant la modélisation du logement pour les dix modes d'habitat basés sur les sous-secteurs statistiques ainsi que pour les différents cas d'étude.

10.1 Les impacts environnementaux du logement : état des connaissances

L'impact environnemental du logement est ici évalué en considérant le bâti (construction et fin de vie des matériaux) ainsi que la consommation d'énergie durant la phase d'utilisation pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire.

Kaenzig et Jolliet (2006) comparent les sources de l'impact environnemental de différents bâtiments en Suisse (en milliers d'écopoints par personne par an – la surface est différente par personne : 44 m² pour les deux première colonnes, 69 m² pour les suivantes).

En moyenne, un tiers de l'impact est dû au chauffage et à l'eau chaude sanitaire (ici au gaz naturel), un tiers à la consommation d'électricité et 15% aux matériaux et à la construction.

Dans un bâtiment Minergie, l'impact environnemental des matériaux passe à un peu plus d'un tiers celui de l'électricité à un autre tiers et celui du chauffage et de l'eau chaude sanitaire à quelques pourcents uniquement. L'isolation est ainsi le facteur clé permettant de réduire l'impact environnemental d'un bâtiment.

Une comparaison par m² habité montre ainsi qu'un bâtiment traditionnel a deux fois plus d'impact au m² qu'un bâtiment SIA basé sur les valeurs limites, et environ 60% de plus qu'un bâtiment Minergie.

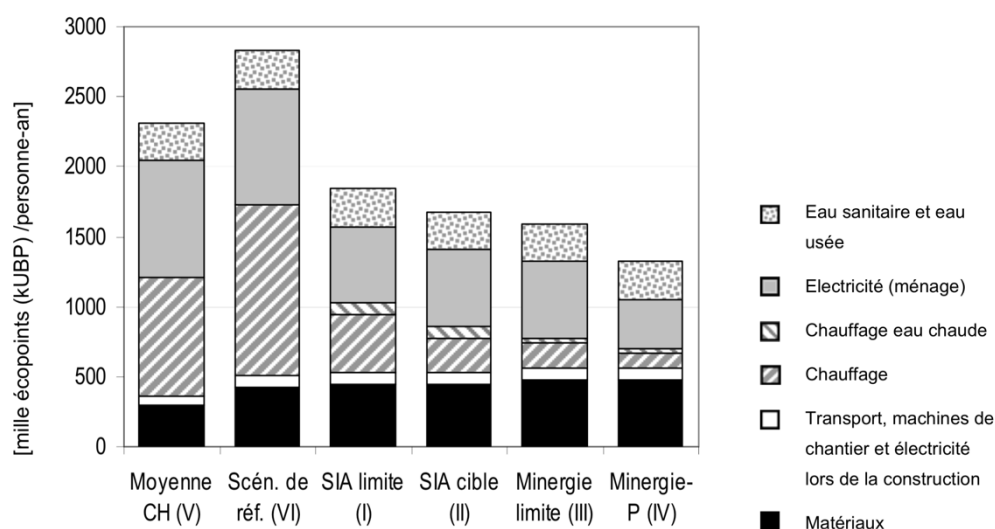


Figure 20. Ecopoints par type de bâtiment en Suisse (limite = valeur limites). Source : (Kaenzig et Jolliet, 2006).

Selon Heeren et al. (2015), l'impact des matériaux est moins important bien qu'il varie, bien entendu, selon leur type : l'impact du bois est par exemple plus faible que celui du béton. Étant donné que le bois a une inertie thermique plus faible, l'impact combiné bâti + énergie consommée est cependant très proche d'un bâtiment en béton pour la plupart des indicateurs (avec une différence notable cependant en faveur du bois (-25%) en termes de réchauffement climatique). Cette évaluation ne prend cependant pas en compte le rôle du bois en tant que stock de carbone dans la lutte contre le réchauffement climatique. Cet aspect est, cependant, actuellement fréquemment discuté dans les milieux scientifiques et il devra probablement être considéré dans un avenir proche.

L'évolution des modes de construction vers plus d'isolation et plus de circulation d'air ainsi que vers une utilisation d'énergie non-fossile pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire signifie que les profils des modes d'habitat en termes d'émission de GES seront fortement modifiés dans les années à venir. Selon Alig et al. (2020), la part de l'impact des matériaux de l'équipement est, ainsi, déjà importante dans les bâtiments récents et va encore augmenter. Dans leur étude d'un bâtiment d'habitation situé à Zurich,

l'équipement compte ainsi pour 23%, ce qui est plus que la part des émissions liées au chauffage et à l'eau chaude sanitaire (pompe à chaleur air-sol). D'après leurs estimations, même si ces émissions vont diminuer, leur part va encore augmenter dans les bâtiments construits en 2030 (29.5%).

Il est à noter, également, que l'impact annuel du bâti est proportionnel au nombre d'années de vie d'un bâtiment : plus celui-ci a une durée de vie longue, plus l'impact annuel du bâti sera réduit. En Suisse, la moyenne d'âge des bâtiments est supérieure à 45 ans et leur durée de vie supérieure à 100 ans. Dans le graphique ci-dessus, la durée de vie est de 50 ans (ce qui est faible) : avec une durée plus réaliste (plus de 90 ans), l'impact environnemental des matériaux sera quasiment divisé par deux. Il est également à noter que la SIA recommande une durée de vie standardisée de 60 ans. Cette recommandation permet ainsi la comparaison de scénarios alternatifs sur une base commune. Cette durée de vie est cependant peu réaliste pour le bâti actuel : une durée de vie plus longue a donc été choisie dans ce rapport.

Par ailleurs, il convient également d'introduire ici une nouvelle notion qui s'impose depuis peu dans une démarche de réduction des Gaz à Effets de Serre (GES), la notion de « net-zéro ». Le net-zéro est atteint lorsque les émissions émises dans l'atmosphère sont égales à celle qui sont retirées de cette dernière. L'une des manières de retirer ces émissions dont l'intérêt est croissant est la séquestration du carbone dans des produits bio-sourcés, dont le bois de construction. L'intérêt de constructions à base de matériaux bio-sourcés semble ainsi renforcé par rapport à des constructions à base de béton. La modification de la méthodologie pour prendre en compte cet aspect, semble ainsi, à terme, nécessaire. En effet, les quartiers construits aujourd'hui verront leur empreinte carbone d'usage liée à l'énergie du bâtiment (vers un 80% renouvelable potentiellement) et à la mobilité pendulaire (télétravail, vélo, voitures électriques) baisser encore plus fortement. L'empreinte des matériaux de construction de ces projets sera alors prépondérante.

Réduction de la consommation énergétique au cours du temps grâce à l'isolation

Les nouveaux bâtiments commencent à être isolés dans les années 1980. Cette isolation intérieure permet de faire chuter la consommation d'énergie pour le chauffage par m² chauffé. Théoriquement (selon les standards SIA), celle-ci chute à 17 litres de mazout équivalent par m² alors qu'elle était autour de 20 litres pour les bâtiments en pierre construits avant 1920 et 25 litres pour les bâtiments en béton ou plots construits dans les années 1950 (22 litres pour les bâtiments des années 1960 à 1970). Dans les années 1990, l'isolation intérieure devient plus épaisse et permet de faire chuter la consommation à 13 litres par m². Le passage à une isolation extérieure améliore l'inertie thermique dans les années 2000 et permet encore de faire chuter cette consommation à environ 10 litres par m². En 2010, les nouvelles constructions se rapprochent du standard Minergie et atteignent (théoriquement) environ 5 litres de mazout équivalent par m².

Il existe ainsi théoriquement **un facteur 4 entre les bâtiments les plus énergivores et les plus récents**. Le standard Minergie P descend même jusqu'à 3 litres par m² (facteur 8) et le standard Minergie Eco peut être neutre. Un bâtiment d'avant 1920 subissant une rénovation dite « lourde » peut ainsi également, théoriquement, diminuer sa consommation de mazout équivalent par 3.5 (de 20 à 6 litres). Le gain est encore supérieur (divisé par 4) pour les immeubles des années 1950.

Choix de la source énergétique

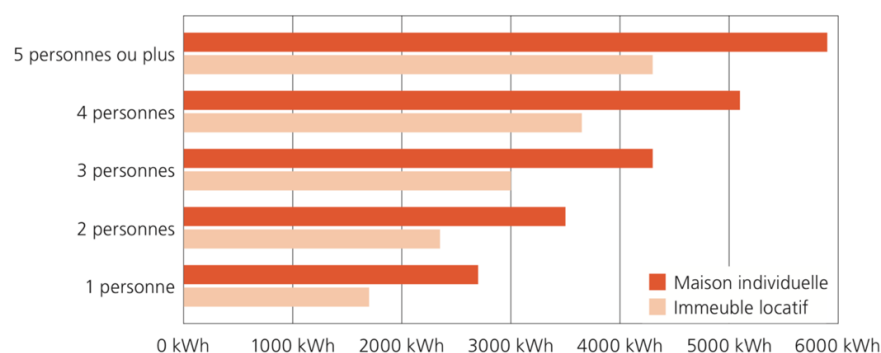
Dans le graphique ci-dessus, la source d'énergie pour le chauffage et de l'eau chaude sanitaire est le gaz naturel (dans le cas de référence et pour la moyenne Suisse). Comme le montre le tableau ci-dessous, **le choix de la source énergétique a des conséquences importantes en termes d'impact**. À Genève, à consommation égale, les émissions de CO₂ du mazout par kWh sont 30% supérieures à celles du gaz (voir le graphique ci-dessous, en colonne 2). Elles sont également 50% supérieures à celles de l'électricité (mix énergétique moyen en Suisse de l'énergie consommée) et 25 fois supérieures à celles du bois. Les émissions de CO₂ du chauffage à distance genevois (CAD) diffèrent selon si celui-ci est « réparti » (énergie fossile principalement) ou « tarifé » (inférieur en termes d'émission de CO₂ au mix électrique genevois) (OCEN, 2018 ; Département du territoire, 2006). Il est à noter que compte tenu de l'interconnexion entre les réseaux du CAD, la valeur utilisée dans ce rapport est de 50% de celle du gaz.

Vecteur énergétique	g CO2/kWh	kgCO2/m2	Proportion par rapport au mazout
Mazout	298	39	100%
Gaz	228	26	67%
CAD tarifé	108	11	28%
CAD réparti	263	28	72%
Electricité	139	11	28%
Bois	11	1	3%

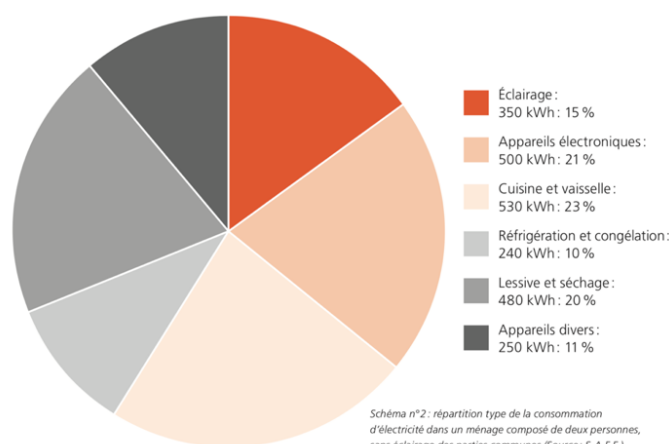
Afin de représenter la réalité, cette vision en termes d'impact par kWh doit cependant être complétée pour considérer les besoins en énergie (indice de consommation moyenne (IDC) par m² des immeubles du parc genevois (en colonne 3). Les bâtiments chauffés au mazout ont, par exemple, un IDC plus élevé (469 MJ/m²) que les autres. Ils consomment ainsi en moyenne 15% de plus que ceux chauffés au gaz.

La consommation d'électricité n'est pas considérée dans cette étude

Comme indiqué dans la figure ci-dessous, la consommation annuelle d'électricité est fortement influencée par le type de bâtiment et le nombre de personnes par ménage (SuisseEnergie, 2018).



Cette consommation étant cependant fortement liée aux comportements volontaires comme le montre la figure ci-dessous, l'électricité n'est pas considérée dans cette étude.



10.2 Dix modes d'habitat basés sur les sous-secteurs statistiques

Les dix premiers modes d'habitat analysés ont été modélisés à l'aide des informations statistiques disponibles au niveau des sous-secteurs statistiques.

L'impact de l'énergie est calculé en multipliant une consommation énergétique par vecteur énergétique par surface habitée par personne (en MJ/m²) et par un facteur d'émission par vecteur énergétique.

La surface par habitant

Ainsi que mentionné dans le Chapitre 4.2, les surfaces habitées par habitant ne sont pas directement disponibles pour Genève. Pour estimer cette donnée, trois options sont possibles. La première, qui a été recommandée par l'OCSTAT, a été appliquée pour calculer les résultats.

Option 1 (recommandée par l'OCSTAT) : surface moyenne selon le nombre de pièces

- Surface totale par sous-secteur = surface moyenne par logement selon le nombre de pièces (OFS : T 09.03.01.14) x nombre de logement de chaque type
- Surface moyenne par habitant = surface totale par sous-secteur / nombre d'habitants par sous-secteur (statistique cantonale)

Les données de l'OFS sont basées sur un recensement (2000) complété par des estimations de 2000. Celui-ci est sujet à caution et des biais sont possibles, potentiellement dus au fait que le Registre des Bâtiments est lacunaire en particulier pour les villas.

De plus, cette approche ne considère que la taille des logements et non les espaces communs. La surface moyenne calculée par habitant est ainsi probablement inférieure à ce qu'elle est réellement. Cet aspect favorise ainsi, à première vue, les habitants des immeubles par rapport aux habitants des villas puisque les couloirs d'accès, partie du logement dans une villa, ne sont pas considérés dans les immeubles.

Option 2 : SITG

L'emprise au sol des bâtiments, le nombre d'étages par bâtiment et le nombre d'habitants par bâtiment sont renseignés dans les SITG, de même que la surface de référence énergétique. Il est donc possible de recréer une densité d'habitant par surface bâtie par sous-secteur, i.e. une surface moyenne bâtie par habitant.

Cette approche a l'avantage de considérer l'ensemble des surfaces, y compris les surfaces communes. Il a cependant le désavantage que le canton de Genève dénombre 21% de bâtiments à usage "mixtes" et qu'il n'est pas possible d'en connaître la partie non allouée au logement.

Option 3 : surface des bâtiments basée sur les types de bâtiments

Reconstruire les modes d'habitat à partir de profils types de bâtiment serait également possible. Bien que moins représentatif statistiquement, cette approche permettrait une modélisation plus fine et serait intéressant pour des cas d'études de cas spécifiques.

La consommation énergétique

La consommation énergétique peut être modélisée de trois manières différentes.

Option 1 : IDC (indice de dépense de chaleur, SITG) moyen et surface calculée par habitant

La consommation énergétique (indice de dépense de chaleur (IDC), exprimé en MJ/m²) peut être extraite des SITG par adresse et agrégée au niveau des sous-secteurs (voir tableau ci-dessous, pour 2017). Celle-ci peut ensuite être combinée avec les informations sur les surfaces moyennes de logement par habitant précédemment calculées afin de calculer les dépenses énergétiques annuelles par habitant. C'est cette option qui a été retenue. Les valeurs correspondent au document de référence fourni par l'OCEN (2018). Les autres approches n'ont pas été explorées.

Option 2 : IDC (indice de dépense de chaleur, SITG) moyen et SRE (Surfaces de référence énergétique, SITG)

Similairement à l'option 1, l'IDC peut être extrait des SITG par numéro de rue. Celui-ci peut ensuite être combiné par adresse avec les données de SRE extraites également des SITG. La consommation énergétique agrégée au niveau d'un sous-secteur peut ensuite être divisée par le nombre d'habitant pour calculer la consommation annuelle par habitant. Les SRE considèrent cependant 21% de surfaces mixtes. Cette approche n'a donc pas été appliquée.

Option 3 : Consommation d'énergie (SITG)

La consommation d'énergie est fournie par type de vecteur énergétique par adresse dans les SITG. Cette valeur considère cependant 21% de surfaces mixtes. Cette approche n'a donc pas été appliquée.

10.3 Méthode d'évaluation des émissions des matériaux

La méthodologie d'évaluation des émissions liées aux matériaux du bâti a fortement évolué au fur et à mesure des mises à jour de ce rapport. Bien que les résultats soient actuellement plus proches de la réalité, cette évolution n'a cependant pas influencé les conclusions, qui restent donc les mêmes que dans la première version du rapport. Afin de comprendre la méthodologie actuelle, qui est hybride, il est utile de commencer par un rappel des différentes étapes :

- A l'origine, celle-ci était basée sur une méthode simplifiée : un simple ratio par rapport aux émissions énergétiques (15%). Bien que basique, elle était suffisante puisque la majorité des bâtiments de l'échantillon étaient anciens et leur chauffage basé sur une énergie fossile, d'où un impact des matériaux largement secondaires par rapport à ceux de l'énergie. Modes d'habitat concernés : A à E, G, H, J, K et L.
- L'ajout de bâtiments (immeubles et villas) récents demandant une modélisation plus précise, une modélisation détaillée basée sur des données d'architecte a été effectuée. Modes d'habitat concernés : F, I, M, N, O
- L'ajout d'un quartier en devenir, celui des Vernets, demandant de travailler sur des données théoriques a été nécessaire. Modes d'habitat concernés : P.
- L'abandon de la méthodologie simplifiée initiale et son remplacement par une approche basée sur les avancées antérieures. Modes d'habitat concernés : A à E, G, H, J, K et L.

Une méthodologie hybride

La méthodologie actuelle est ainsi hybride. Elle est, tout d'abord, basée sur une modélisation détaillée pour trois types de bâtiments basée sur une liste des matériaux établie par un bureau d'ingénieur (Victor Martin Ingénieur) grâce aux informations fournies par maîtres d'ouvrage. Les informations manquantes sont basées sur un avis d'expert reflétant les pratiques courantes pour ces types de bâtiments. Trois bâtiments ont été considérés :

- Un immeuble récent en écoquartier : Les Vergers à Meyrin, bâtiment Rez + 5 étages en structure bois. Le bâtiment est modélisé en se basant sur les plans d'architectes (fournis par les architectes du projet) et les modèles de consommation d'énergie (fournis par l'Université de Genève).
- Un immeuble récent, bâtiment Rez + 5 étages en béton armé avec façade en éléments béton préfabriqués : La Chapelle à Lancy. Les plans d'architectes n'ayant pas pu être obtenus, l'immeuble a été modélisé sur le même gabarit que le bâtiment des Vergers mais en considérant les matériaux (quantités et types) propres à ce type de bâtiment. La consommation d'énergie provient de l'IDC disponible sur le SITG et le vecteur énergétique fournit par un contact avec l'équipe thermique de SIG (CAD).
- Une villa récente : maison en béton Rez + 1 étage en béton armé. Le bâtiment est modélisé en se basant sur les plans d'architectes (fournis par l'habitant) et les consommations réelles d'énergie (fournies par l'habitant).
- Le niveau de détail de la modélisation est illustré dans la figure ci-après.

Partie d'ouvrage	Eléments	Matériaux	Longueur	Largeur/Hauteur	Epaisseur m	Facteur	Surface m2	Volume m3
0. Excavation	Déblais	MEX						0.0
0. Excavation	Remblais	Grave						0.0
1. Fondations	Dalle de propreté	Béton maigre			0.05		480	24.0
1. Fondations	Radier	Acier armature				150		132.0
1. Fondations	Radier	Béton armé			0.3		440	132.0
2. Sous-Sol	Dalle	Acier armature				120		105.6
2. Sous-Sol	Dalle	Béton			0.24		440	105.6
2. Sous-Sol	Isolation extérieure	XPS	64	1.0	0.24		64	15.4
2. Sous-Sol	Murs	Acier armature				90		95.0
2. Sous-Sol	Murs ext.	Béton	64	2.7	0.22			38.0
2. Sous-Sol	Murs int.	Béton	96	2.7	0.22			57.0
3. RDC	Chape	Mortier			0.07		400	28.0
3. RDC	Plancher	Parquet Bois			0.015		180	2.7
3. RDC	Plancher	Carrelage céramique			0.01		80	0.8
3. RDC	Cloisons revêtement	Plâtre plaque	20	3.0	0.02			1.2
3. RDC	Cloisons isolant	Laine de roche	20	3.0	0.08			4.8
3. RDC	Cloisons ossature	tôle métallique	20	3.0		8.00E-04		0.048
3. RDC	Enduit	Plâtre			0.005		815	4.1
3. RDC	Revêtement extérieur	Béton préfab.	60	3.0	0.08		180	14.4
3. RDC	Revêtement extérieur	Acier armature				80		14.4
3. RDC	Dalle	Acier armature				120		96.8
3. RDC	Dalle	Béton			0.22		440	96.8
3. RDC	Fenêtres	Double vitrage					84	
3. RDC	isolant phonique	Mousse			0.05		400	20.0
3. RDC	Isolation extérieure	PUR	90	3.0	0.26		270	70.2
3. RDC	Murs	Acier armature				90		82.5
3. RDC	Murs ext.	Béton	60	3.0	0.15			27.0
3. RDC	Murs int.	Béton	65	3.0	0.18			35.1
4. Etage	Chape	Mortier			0.07		400	28.0

Cette modélisation détaillée permet ainsi d'évaluer l'impact environnemental de six modes d'habitat (F, I, M, N, O et P). En effet, par analogie, la même villa a été utilisée pour les calculs dans trois endroits différents : dans le canton de Vaud proche de Nyon (Dullier), en France voisine proche du CEVA (Machilly), en France dans les environs d'Annecy (Poisy). Concernant les impacts liés au logement, cette localisation influe sur le type d'énergie utilisée pour le chauffage (mazout et électricité).

Ensuite, une extrapolation à d'autres types de bâtiments, plus anciens :

- Une maison d'avant l'an 2000, basée sur la modélisation de la maison récente (a)
- Quatre types d'immeubles anciens, basés sur la modélisation du bâtiment en béton (b)

Cette extrapolation permet ainsi d'évaluer l'impact environnemental des modes d'habitat A à E, G, H, J, K et L.

Étape 1 : Modélisations détaillées

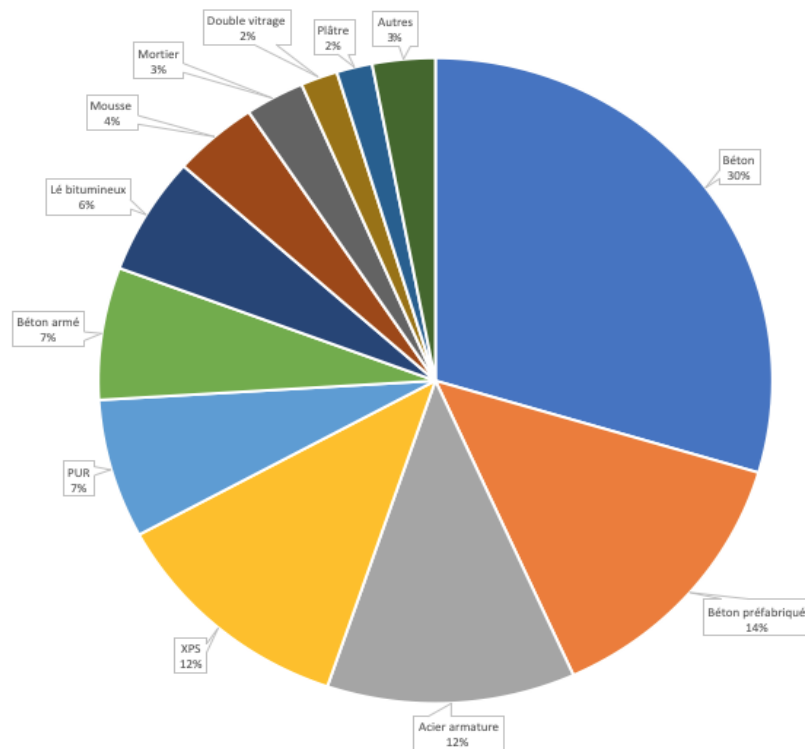
Les modélisations détaillées sont basées sur les plans d'architecte, les surfaces brutes de plancher ainsi que sur le nombre de personnes par bâtiment. Ces modélisations considèrent les matériaux pour les fondations, les étages et le toit. Les facteurs d'émissions pour chacun des matériaux sont extraits de la base de données de la KBOB. L'équipement est considéré de manière générique à l'aide des recommandations de la KBOB, c'est-à-dire par m2 de surface de SRE.

Les émissions sont tout d'abord calculées pour l'ensemble du bâtiment sur l'ensemble de la durée de vie, sans considérer de rénovation. Les émissions annuelles sont ensuite calculées en effectuant une hypothèse concernant la durée de vie du bâtiment (100 ans) et des équipements (30 ans). Les émissions par personne par année sont ensuite calculées en considérant le nombre d'habitant par bâtiment.

Habiter dans une maison en béton (45 m2 par personne) induit un impact carbone liés aux matériaux 60% plus important que dans un immeuble en béton préfabriqué (36 m2 par personne). Ceci est dû à la moindre quantité de matériaux (26% d'impact en plus par m² dans la maison) et à la surface inférieure par personne. Habiter dans un immeuble performant d'un point de vue des matériaux permet de réduire l'impact par personne de 30% par rapport à un bâtiment en béton préfabriqué.

Dans un immeuble d'un étage + Rez, 45% à 50% de l'impact des matériaux est induit par les fondations, le sous-sol et le toit, 28-32% par le Rez-de-chaussée et 22 à 24% par l'étage. Une illustration de la contribution des différents matériaux au réchauffement climatique pour un immeuble en béton (seul le Rez + un étage sont ici considérés) est proposée ci-dessous. Un immeuble de 5 étages + Rez induit environ 90% d'impact supplémentaire par rapport à un immeuble d'un étage + Rez.

Immeuble béton d'un étage + Rez
Proportion des émissions de gaz à effet de serre (en kg de CO₂-équivalent) par type de matériau.



Étape 2 : Extrapolations à d'autres types de bâtiment

Schwab et al. (2016) proposent une typologie des immeubles (10 cas d'étude) couvrant les années 1900 à 1990 en Suisse Romande ainsi qu'une description de chacun des types (comprenant la Surface de Référence Énergétique (SRE), le nombre d'étages, les matériaux utilisés, etc.). Quatre cas d'étude correspondent aux modes d'habitat choisis dans ce rapport :

- Un immeuble ancien de 1901 (cas d'étude 1)
- Un immeuble 1946-1970 de 1960 (cas d'étude 4)
- Une tour de 1975 (cas d'étude 7)
- Un immeuble de 1988 (cas d'étude 10).

Les émissions de chacun de ces types de bâtiments sont tout d'abord extrapolées à partir des modélisations détaillées afin de permettre la prise en compte des différences pertinentes :

- Un plus grand nombre d'étages.
- D'autres types de matériaux afin de considérer tant les bâtiments en béton qu'en pierre (calcaire).
- L'isolation moindre des bâtiments anciens (basée sur une hypothèse d'une diminution des impacts liée à l'isolation de 50%).

Les émissions liées aux matériaux de chacun des modes d'habitat retenus dans ce rapport sont ensuite calculées en trois étapes en se basant sur la surface habitée par personne.

- Le calcul des émissions par m² de SRE, sur l'ensemble du cycle de vie, pour chaque type de bâtiment.
- Le calcul des émissions annuelles par m² de SRE, basé sur une durée de vie spécifique différant selon les bâtiments (100 ans pour les bâtiments de moins de 100 ans et 150 ans pour les autres).
- Le calcul des émissions par personne par année en utilisant la seule donnée de surface disponible, i.e. la surface habitée par personne et trois hypothèses : (a) la surface habitée est égale à la surface utile, (b) la surface utile est égale à 75% de la Surface Brute de Plancher (SBP) pour les immeubles et à 84% pour les villas, (c) la SBP est égale à la SRE.

Qualité des résultats et durée de vie

L'application d'une nouvelle méthodologie a permis d'améliorer la précision des résultats sans cependant modifier les résultats de l'analyse et le message qui en découle. Il reste ainsi identique depuis le début du projet. Il est à noter cependant que pour certains des bâtiments, les émissions liées au bâti ont pu être fortement modifiées.

Les résultats présentés dans ce rapport diffèrent des résultats habituellement présentés, e.g. dans la norme SIA 2040 ou dans Alig et al. (2020), du fait d'une prise en considération d'une durée de vie non-standardisée (qui est décidée à 60 ans). Ce choix d'une durée de vie différente dans ce projet (100 ans pour les bâtiments nouveaux et 150 ans pour les bâtiments anciens) est justifié par la question posée dans ce rapport et la réalité de l'habitat à Genève : tous les bâtiments construits avant 1960 ont effectivement une durée de vie supérieure à 60 ans. A titre de validation des résultats, une évaluation a également été réalisée avec une durée de vie standardisée de 60 ans. Dans ce cas, les résultats sont tout-à-fait compatible avec les deux références mentionnées ce qui tend à démontrer la validité de l'approche suivie.

L'effet de la durée de vie dans les résultats confirme l'importance de cet aspect dans le monde réel et donc la nécessité de valoriser le bâti existant, afin d'en prolonger la durée de vie, notamment lors de planifications territoriales.

10.4 Discussion sur les données de surface habitée de nombre d'habitants par bâtiment

Surface de référence et nombre d'habitants par bâtiment

Concernant les surfaces de référence, la seule comparaison possible - compte tenu des données à disposition - entre les trois modes d'habitat est celle de la surface par logement³⁷. En termes de Surface de Référence Énergétique (SRE) et Surface Brute de Plancher (SBP), la surface par logement moyenne aux Vernets est proche de celle de la Chapelle. Elle est en revanche inférieure à celle des Vergers (entre 14% et 16%). Bien que cette valeur ne soit pas utilisée dans les calculs, une comparaison en termes de Surface Nette (SN) montre cependant une information différente : la surface est équivalente entre les Vernets et la Chapelle et légèrement supérieure à celle des Vergers (5%). Il est à noter cependant que les définitions même des surfaces considérées ne correspondent pas exactement aux besoins de cette étude. Ainsi, les surfaces communes (chambre d'amis, local de bricolage, etc.) ne sont pas considérées dans la SBP des Vergers et de la Chapelle bien que ce type de surface soit valorisé dans les bâtiments récents.

	Les Vernets	La Chapelle	Les Vergers
SRE/logement (m2)	104	106	119
SBP/logement (m2)	97	102	113
SN/logement (m2)	75	76	71

Concernant le nombre d'habitants par bâtiment, une comparaison est possible en combinant plusieurs sources de données : les données reçues par les services de l'État durant ce projet pour les Vernets et les informations reçues de la coopérative Équilibre lors de la réalisation du rapport initial, aucune donnée n'étant disponible pour la Chapelle. Ces données sont de qualité différente : le nombre d'habitants est reporté pour les Vergers (bâtiment de la coopérative Équilibre) alors qu'il est estimé pour les Vernets. Le chiffre pour la Chapelle est basé sur celui des Vergers (en italique), par analogie.

	Les Vernets	La Chapelle	Les Vergers (Bâtiment équilibre)
habitants/logement (m2)	3	2.7	2.7

³⁷ Le nombre d'habitants à la Chapelle et aux Vergers n'est pas connu, et le nombre de pièces n'est pas connu pour les Vergers. Il est à noter que la comparaison de la surface par nombre de pièces entre les Vernets et la Chapelle donne un résultat similaire à la comparaison de la surface par nombre de logements.

Ce qui conduit à une estimation de la surface par habitant de trois manières différentes :

- Basée sur un nombre d'habitants estimés pour les Vernets.
- Basée sur le nombre d'habitants du bâtiment de la coopérative Équilibre pour les Vergers.
- Basé sur les Vergers pour la Chapelle (en italique).

	Les Vernets	La Chapelle	Les Vergers (Bâtiment équilibre)
SRE/habitant (m2)	34.3	<i>47</i>	47
SBP/habitant (m2)	32.1	<i>37.1</i>	37.1
SN/habitant (m2)	24.7	<i>27.4</i>	27.4

Compte tenu des informations disponibles, il semble ainsi correct d'estimer que la surface par habitant est inférieure aux Vernets par rapport aux Vergers. L'estimation de la surface par habitant de la Chapelle est cependant sujette à caution. Celle-ci a été modélisée comme étant égale à celle des Vergers dans le rapport initial mais la comparaison des surfaces par logement montre plutôt une similarité avec les Vernets.

Par conséquent, la comparaison entre les Vernets et les Vergers semble acceptable mais l'évaluation de la Chapelle est peu robuste. Dans le cas où le nombre réel d'habitants serait supérieur à celui considéré ici, l'impact environnemental par personne s'en trouverait réduit et le classement modifié.

11 Annexe 3. Modélisation de la mobilité

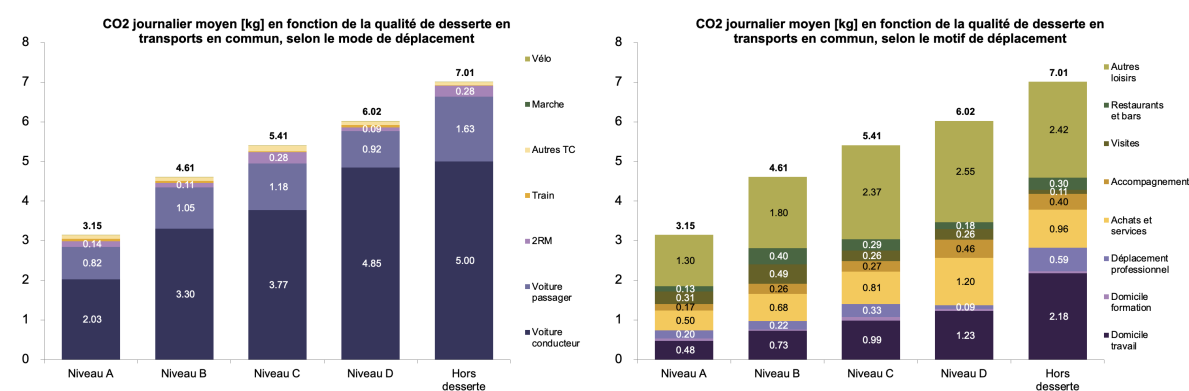
Cette annexe centrée sur le volet mobilité présente des éléments analytiques supplémentaires dans deux domaines :

- Le diagnostic détaillé de l'association statistique bivariée entre les variables d'influence territoriale et la mobilité;
- Détails quant au modèle d'évaluation de l'impact environnemental de modes d'habitats sur la base de caractéristiques territoriales des modes d'habitat en contrôlant l'effet revenu ; ce modèle a pour ambition de servir d'outil prospectif pouvant être réutiliser sur d'autres modes d'habitat, existant ou en devenir.

11.1 Impact selon les facteurs territoriaux – Analyses bivariées

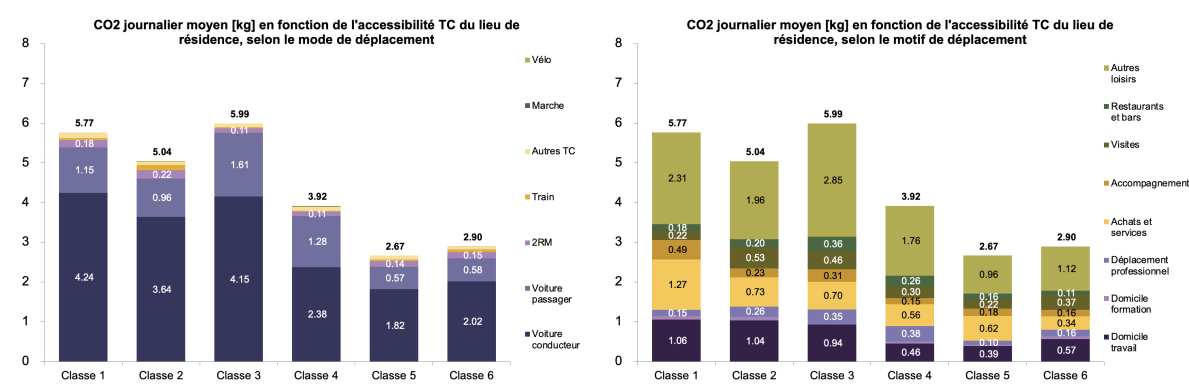
L'influence de la qualité de desserte TP

Du point de vue de la qualité de desserte du lieu de résidence, on constate que celle-ci semble influencer de manière significative l'impact environnemental des personnes. En effet, entre le niveau A et les personnes situées hors desserte TC, les émissions sont multipliées par 2. Cette tendance s'observe d'ailleurs de manière régulière à mesure que la qualité de desserte se réduit, avec un impact toujours croissant d'un niveau à l'autre. On voit donc ici que les hypothèses issues de la littérature sont confirmées.



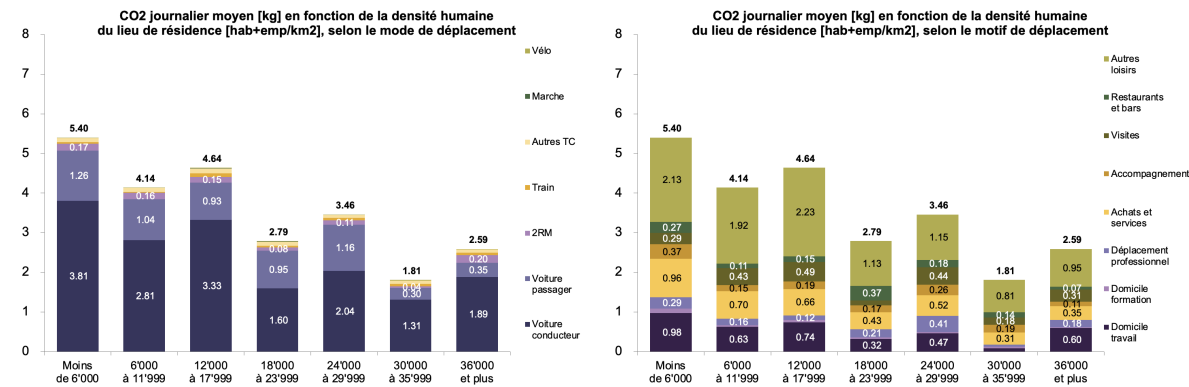
L'influence l'accessibilité territoriale en TC

Du point de vue de l'accessibilité territoriale en TC, une tendance similaire à celle relative à la qualité de desserte s'observe. Précisons ici que l'accessibilité et d'autant meilleure que la classe est élevée, on a donc une tendance à la réduction de l'impact environnemental à mesure que l'accessibilité augmente. Pour autant, notons que si la tendance existe, celle-ci est moins marquée qu'elle ne l'est pour la qualité de desserte. On observera par exemple que l'impact est plus élevé pour la classe 3 qu'il ne l'est pour les classes 1 et 2. Respectivement, il est plus faible pour la classe 5 qu'il ne l'est pour la classe 6.



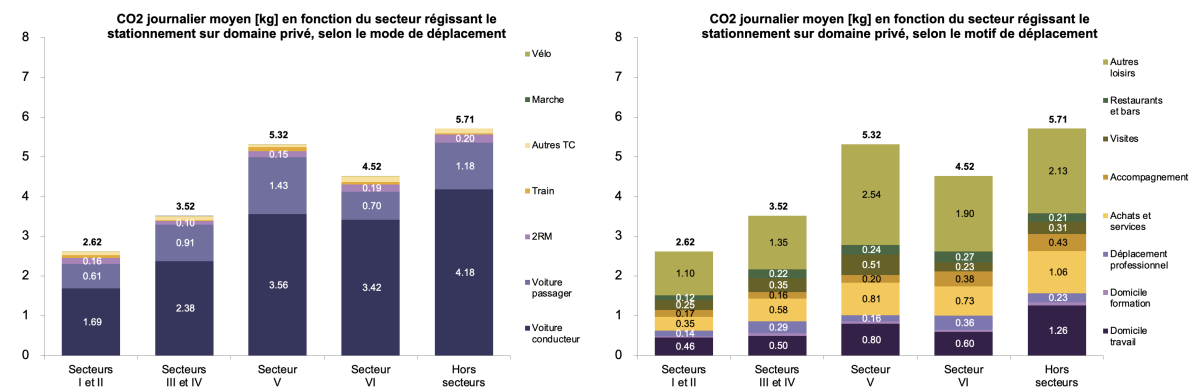
L'influence de la densité humaine

Comme pour l'accessibilité en TC, la densité humaine, à mesure qu'elle augmente, s'accompagne effectivement d'une réduction de l'impact environnemental, tendancielle en tout cas. Pour autant, on observe une variabilité nécessitant là aussi des analyses plus détaillées en vue de déterminer l'influence réelle de ce facteur sur les comportements de mobilité et leur impact associé.



Influence de la contrainte de stationnement (RPSFP)

S'agissant de l'impact journalier en fonction du secteur RPSFP³⁸, de même que pour les 2 facteurs précédents, on constate bien une tendance similaire à celle escomptée sur base de la littérature, à savoir que plus le stationnement est réduit, plus l'impact environnemental est faible, en particulier celui imputable au TIM. Pour autant, la variabilité existante entre les différents secteurs, notamment le V par rapport au VI requiert des analyses plus détaillées.



³⁸ Notons ici que les secteurs de stationnement ont dû être agrégés pour que les analyses présentées ici et effectuées plus après soient représentatives d'un point de vue statistique.

L'influence de la typologie du bâtiment

S'agissant de la typologie du bâtiment de résidence, il paraît plus difficile d'identifier une tendance claire. En effet, la littérature ne semblait pas indiquer un lien spécifique entre le bâti et les comportements de mobilité, lien que l'on pourrait essayer d'infirmer ou confirmer ici, dans le contexte genevois. À ce stade, on peut donc raisonnablement considérer qu'il n'y a pas de lien avéré entre le type de bâti et les comportements de mobilité des gens y résidant.

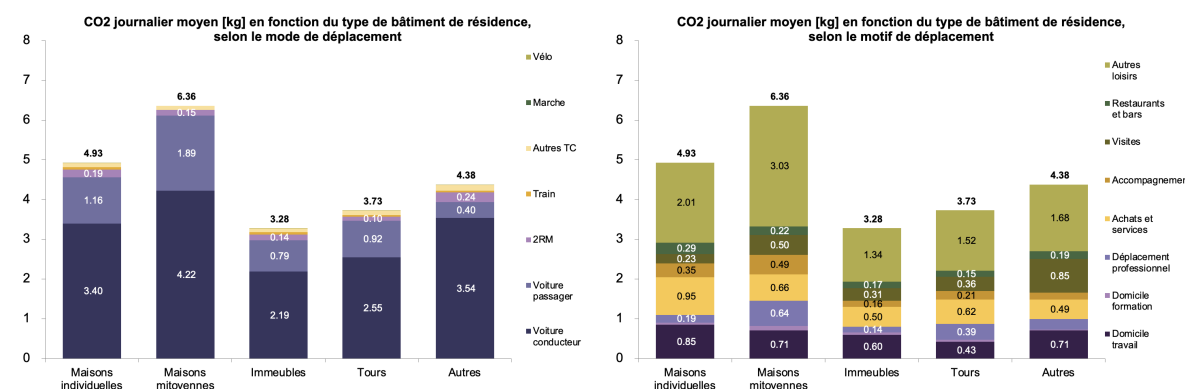


Tableau 10. Corrélations bivariées entre le revenu d'équivalence des personnes et les facteurs socioterritoriaux

	Corrélation de Pearson	Significativité
Densité humaine du lieu de domicile	-0.154	< 0.01
Niveau de qualité de desserte en TC	-0.154	< 0.01
Secteur de régime de stationnement (RPSFP)	-0.173	< 0.01
Accessibilité territoriale en TC	-0.138	< 0.01
Typologie du bâtiment de résidence	-0.192	< 0.01
Taux de motorisation des personnes	+0.194	< 0.01

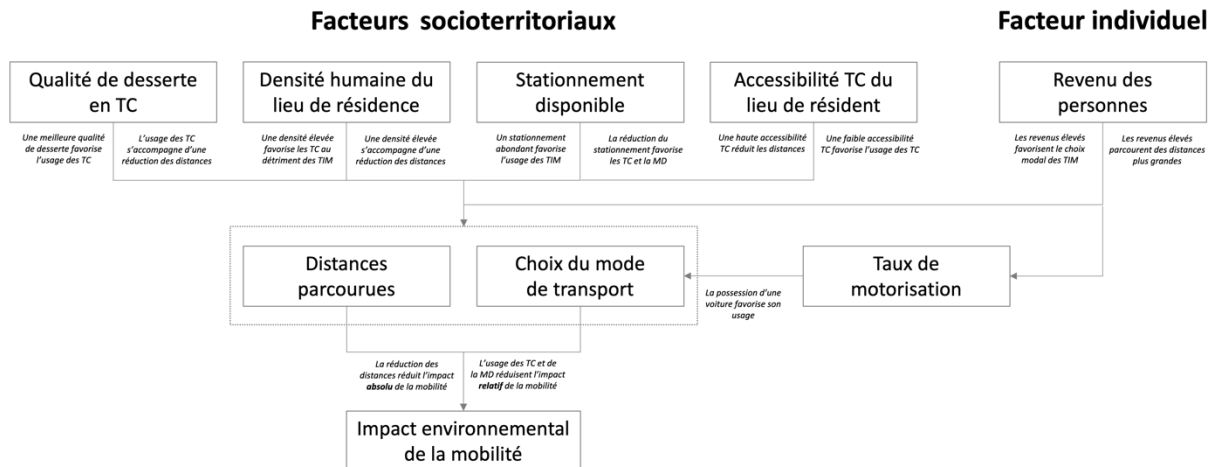
Ci-dessus, la corrélation de Pearson indique le sens de la relation entre le facteur et l'impact de la mobilité ; si la relation est de signe négatif, cela signifie que plus l'augmentation du facteur s'accompagne d'une réduction de l'impact. Inversement, pour la motorisation, le signe positif indique que l'augmentation de la motorisation s'accompagne d'une augmentation de l'impact. La significativité, avec < 0.01 pour toutes les variables, signifie qu'il y a plus de 99% de probabilité (> 1 - 0.01) que la prise en compte de la variable dans le modèle explique mieux la variabilité du phénomène (variabilité de l'impact environnemental de la mobilité).

11.2 Modèle d'évaluation de l'impact environnemental

Description du modèle

Il y a 2 catégories d'intrants dans le modèle. D'une part les facteurs socioterritoriaux, dont il s'agit justement d'identifier l'impact net dans le modèle, et d'autre part un facteur individuel, le revenu des personnes. Comme montré précédemment, le revenu est fortement corrélé aux différents facteurs socioterritoriaux, de même qu'aux taux de motorisation des personnes, qui chacun vont ensuite influencer l'impact environnemental final.

Figure 21: Schéma conceptuel rendant compte du modèle et de la manière dont les différentes composantes agissent les unes sur les autres



Régression linéaire

Dans le cadre de cette modélisation, il a été choisi de recourir à un modèle dit linéaire qui s'avère adapté à ce que l'on a pu observer précédemment. En effet, comme on a pu le voir sur les 4 graphiques issus des ANCOVA, les relations entre les facteurs territoriaux et l'impact environnemental sont des relations linéaires, à savoir que l'on observe une tendance générale dont la particularité est que la croissance (positive ou négative) de l'impact environnemental est la même en passant d'une classe à l'autre, pour chacun des facteurs. En d'autres termes, la courbe de tendance s'apparente à une droite, et non une courbe.

Structure du modèle élaboré

Le modèle ayant été élaboré est un modèle linéaire composé des 4 facteurs socioterritoriaux retenus ainsi que d'une constante. Voici son expression :

Le modèle peut être lu comme suit : à partir d'une constante élevée (6.28), l'impact estimé se réduit à mesure que chacun des 4 termes prend une valeur élevée. En effet, chacun des coefficients de multiplication se caractérise par un signe négatif, ce qui signifie donc que plus la valeur de la variable sera élevée, plus le produit de la multiplication prend une grande valeur négative. Soit une grande valeur qui viendra se soustraire à la constante initiale. Comme on l'observe dans le tableau ci-dessous, les variables ont été préalablement codées, selon les analyses bivariées effectuées précédemment, soit que le sens de la relation entre le facteur socioterritorial et la valeur attendue de l'impact soit toujours le même pour chacun.

Tableau 11. Codage des variables telles qu'elles ont été utilisées dans l'élaboration du modèle

Facteur socioterritorial	Type de variable	Valeurs de la variable	
		Libellés de la valeur	Codage
α : Niveau de qualité de desserte en transports en commun	Variable catégorielle	Niveau D et hors desserte	1
		Niveau C	2
		Niveau B	3
		Niveau A	4
β : Secteurs de stationnement RPSFP	Variable catégorielle	Hors secteur	1
		Secteur VI	2
		Secteur V	3
		Secteurs III et IV	4
		Secteurs I et II	5
γ : Densité humaine	Variable continue	La variable croît à mesure que la densité augmente	
δ : Accessibilité en transports en commun	Variable continue	La variable croît à mesure que l'accessibilité augmente	

Comme on l'observe ci-dessus, on retrouve bien la logique du sens de la relation, pour les différentes variables. En effet, pour la qualité de desserte, plus celle-ci augmente, plus la valeur que prendra la variable augmentera également, ayant pour effet de réduire l'impact, comme expliqué ci-dessus. Il en va ainsi de même pour chacune des variables utilisées dans le modèle.

Tableau 12. Coefficients de la régression

	Niveau de qualité de desserte	Accessibilité TC	Densité humaine	Secteurs stationnement
Coefficients non standardisés	-859	-0.060	-0.054	-708
Coefficients standardisés	-0.066	-0.077	-0.072	-0.078

Finalement, les coefficients standardisés ci-dessus permettent de comparer la « participation » de chaque facteur au pouvoir explicatif global du modèle. Comme on le voit, chaque facteur participe de manière plus ou moins équivalente à l'ensemble, bien que la qualité de desserte légèrement moins.

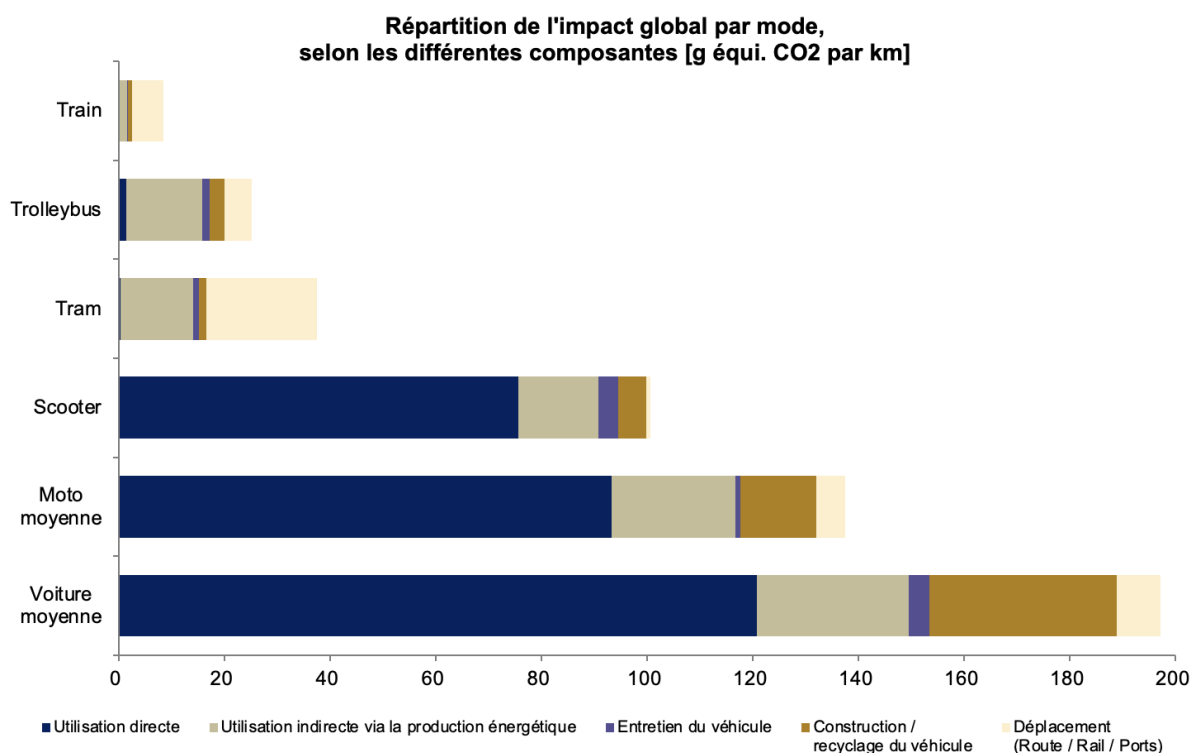
Ces observations sont d'autant plus importantes qu'elles permettent également d'apporter des éléments d'orientation des politiques territoriales ayant pour objectif une réduction de l'impact environnemental de la mobilité. En effet, du fait que chacun des 4 facteurs socioterritoriaux participent de manière équivalente à l'impact global, il apparaît que ce sont autant de leviers devant être actionnés de manière complémentaire, sans que l'un ou l'autre ne puisse suffire à lui seul.

11.3 Base mobitool des coefficients d'émission par mode

Les impacts environnementaux des déplacements selon les différents modes peuvent être distingués selon 5 catégories :

- Utilisation directe du véhicule
- Utilisation indirecte, via la production énergétique nécessaire
- Entretien du véhicule
- Construction et recyclage du véhicule
- Entretien des infrastructures nécessaires au véhicule (route, rail, ports, etc.)

Ci-dessous, est présenté l'impact environnemental selon ces différentes composantes pour certains des modes analysés dans cette étude, et ceci sur la base des chiffres de mobitool (v2.0.2).



Comme on l'observe, l'impact global est très différent selon les modes, l'impact d'une voiture moyenne étant 24 fois plus élevé que celui d'un train RER moyen en Suisse. L'intérêt de la base de données mobitool est d'offrir une base extrêmement exhaustive de l'impact environnemental des modes de transport. Car si le graphique ci-dessus rend compte de l'impact d'une voiture moyenne ou d'une moto moyenne, la base mobitool est en réalité beaucoup plus détaillée, permettant la prise en compte du poids des véhicules, de leur taux d'occupation et de remplissage, ou encore des normes EURO ou leur mode de propulsion.

11.4 Détail des motifs inclus dans les catégories MRMT

Libellé MRMT	Libellé agrégé
Travailler	Travail
Formation	Formation
Voyages de service	Déplacement professionnel
Activité professionnelle	Déplacement professionnel
Achats	Achats et services
Utilisation de prestation de services	Achats et services
Accompagnement d'enfant	Accompagnement
Accompagnement, rendre service	Accompagnement
Visites	Visites
Restaurants, bars, cafés	Restaurants et bars
Sport	Autres loisirs
Randonnée	Autres loisirs
Vélo	Autres loisirs
Sport passif	Autres loisirs
Extérieur	Autres loisirs
Wellness	Autres loisirs
Culture, loisir	Autres loisirs
Bénévolat	Autres loisirs
Associations	Autres loisirs
Excursions	Autres loisirs
Religion	Autres loisirs
Domicile	Autres loisirs
Picnic	Autres loisirs
Shopping	Autres loisirs
Tour	Autres loisirs
Autre	Autres loisirs
Ne sait pas	Autres loisirs
Pas de réponse	Autres loisirs
Retour à la maison ou hébergement hors domicile	Autre
Autres	Autre

11.5 Sources des données

Sont ici présentées les différentes sources de données étant mobilisées dans le cadre du volet mobilité de cette étude.

Microrecensement Mobilité et transport 2015

Le MRMT est produit par l'ARE et l'OFS tous les 5 ans. Il se compose de plusieurs modules, notamment un relatif à la mobilité quotidienne, un autre relatif à la mobilité occasionnelle. À ces modules sur la mobilité s'ajoutent ceux relatifs aux caractéristiques des personnes et des personnes de leur ménage ainsi qu'un module portant sur les préférences déclarées en matière de transport. Nous nous concentrons dans cette étude sur la mobilité quotidienne, à l'aune de certaines des caractéristiques des personnes et de leur ménage.

Indicateurs mobitool

Les indicateurs mobitool consistent en une base de données indiquant l'impact environnemental par [km] de l'utilisation de différents modes de transport. Dans le cadre de cette étude, la version 2.0.1 a été utilisée.

Niveau de qualité de desserte en transports en commun

L'indice de niveau de qualité de desserte en TC tel que définit précédemment consiste en une couche SIG directement disponible sur le site de l'ARE.

Accessibilité territoriale en transports en commun

L'accessibilité territoriale en TC a été calculée par 6t dans le cadre d'un mandat pour l'OCT. Cet indice se base sur les données issues du modèle multimodal transfrontalier, lui-même calibré entre autres sur les données du MRMT 2015.

Densité humaine du lieu de résidence

La densité humaine a été calculée sur la base des données de la statistique de la population (STATPOP) ainsi que de la statistique des entreprises (STATENT), toutes deux disponible sur le site de l'OFS.

Régime de stationnement

Les données relatives au RPSFP – à savoir les secteurs définis au sein du territoire genevois – consiste également en une couche SIG. Ces données sont disponibles auprès du système d'information du territoire genevois (SITG).

12 Annexe 4. Hypothèses de travail



REPUBLIQUE ET CANTON DE GENEVE
Département du territoire
Direction générale de l'environnement

NOTE INTERNE

Aux mandataires de groupe de suivi
27 septembre 2018

Mandat impact environnemental des modes d'habitats

Hypothèses de travail:

Il est attendu que le mandat apporte des réponses aux hypothèses suivantes:

- ∨ La localisation des modes d'habitat influence la mobilité et partant la consommation de ressources naturelles.
- ∨ La densité des modes d'habitat influence la consommation énergétique, de sol, la biodiversité, la quantité et la qualité des espaces verts.
- ∨ Les modes d'habitat influencent le tissu bâti et donc les espaces verts et la biodiversité.
- ∨ Les modes d'habitat influencent les ressources mobilisées pour la construction.
- ∨ Une même densité bâtie, peut avoir divers impacts environnementaux (selon le tissu bâti, le mode de construction, l'éloignement du centre-ville, etc.).
- ∨ Un habitat dense bien desservi par les TP à un moindre impact environnemental par habitant, qu'un habitat individuel avec une faible desserte TP. Rapporté à l'habitant le principe de la ville compacte se vérifie comme ayant un moindre impact environnemental.
- ∨ Un tissu bâti peu dense (villa individuelle) implique une plus grande imperméabilisation de surface au sol par habitant qu'un tissu dense (habitat collectif central).
- ∨ La mobilité générée par l'habitat des zones à faible densité, excentrées et mal desservies par les TP, a des impacts environnementaux et sur la santé des habitants au-delà desdites zones.
- ∨ Il existe un potentiel important de réduction de l'impact environnemental et de gain de qualité (environnement, biologie, bruit, air, santé) dans les zones centrales bien desservies par les TP et la MD par la limitation de la circulation automobile venant de l'extérieur (meilleure qualité de l'air, nouvelles possibilités d'arborisation, gain en espaces verts et publics sur les espaces de stationnement, etc.).
- ∨ La mutation de tissus composés de villas en tissus plus denses peut être réalisée en préservant les qualités écologiques du tissu initial si une attention particulière est portée au respect des espaces verts et arborés existants ou à leur intégration, ainsi qu'à la qualité des constructions et à la qualité de la desserte TP et MD.
- ∨ Les modes d'habitat influence les choix des systèmes énergétiques.
- ∨ Les modes d'habitat influence la politique de déploiement des réseaux thermiques.

2018.09.27_hypothèses_etude_types_habitats_et_environnement_TVFD.docx

Service de l'environnement et des risques majeurs • Quai du Rhône 12 • 1205 Genève
Tél. +41 (0) 22 388 80 30 • E-mail serma@etat.ge.ch • www.ge.ch/serma
Lignes TPG 14, D – arrêt Palladium

- ∇ Les choix des matériaux de construction et les systèmes énergétiques ont un impact sur l'environnement.
- ∇ Le comportement individuel impact les résultats du collectif par rapport aux objectifs des différentes politiques publiques.

Groupe de suivi/27.09.2018

13 Annexe 5. Compte-rendu de la revue critique du rapport effectuée par la HEG.

Dans le cadre du développement d'un outil d'évaluation des projets d'aménagement (PLQ) sous l'angle de la durabilité par la HEG, une synthèse des travaux existants a été effectuée.⁴⁰ Dans ce cadre, la présente étude a été commentée dans sa version de janvier 2020.

D'après Baranzini et al. (2020), les principales **forces** de l'étude sont :

- Des hypothèses de travail, une sélection des modes d'habitat ainsi que des indicateurs pertinents,
- Une rigueur scientifique élevée,
- Une grande utilité potentielle des résultats pour évaluer la durabilité des projets d'agglomération.

Les principales **faiblesses** de l'étude sont, quant-à-elles :

- Le périmètre de la mobilité : mobilité pendulaire uniquement*,
- Le fait de ne fournir qu'un seul indicateur : en termes d'émission de CO2-equivalent,
- Le fait de ne pas présenter les résultats par ménage mais par personne,
- L'évidence de certains résultats et de certaines réponses aux questions du comité de pilotage.
- La non-prise en compte du contexte (type de quartier, etc.),
- Le fait que certains résultats principaux pourraient être renversés avec des données plus complètes sur la mobilité (notamment loisirs)*,
- Un manque de synthèse de l'analyse des cas spécifiques.

Réponse des auteurs : Les faiblesses identifiées sont, hormis la dernière, toutes connues et découlent des choix effectués avec le comité de pilotage ainsi que des données disponibles. Concernant la dernière, ce rapport vient compléter cet aspect.

Il en résulte, ainsi, d'après Baranzini et al. (2020), les menaces suivantes :

- Considérer uniquement un indicateur lié au climat n'est pas suffisant pour effectuer une analyse en termes de durabilité (autres indicateurs environnementaux, lien avec le bien-être). Ce qui est potentiellement un risque. Réponse des auteurs : Cet aspect a été évoqué avec le comité de pilotage. Une discussion avec l'UNIGE pour l'intégration des aspects liés à la biodiversité a été initiée.
- L'étude est simplificatrice d'une problématique difficile à synthétiser, ce qui est potentiellement un risque. Réponse des auteurs : Il s'agit effectivement d'un risque. La différence entre les modes d'habitat n'ayant toutefois pas été évaluée de manière aussi claire auparavant, ce rapport semblait une étape nécessaire à tout approfondissement.

* NB : Les autres motifs de mobilité ont été pris en compte dans cette nouvelle version du rapport.

⁴⁰ Baranzini Andrea, Cornaglia Laurent, Maradan David (2020). Développement d'un outil d'évaluation des projets d'aménagement (PLQ) sous l'angle de la durabilité par la HEG. Synthèse des travaux existants et mise en évidence des enseignements-clés pour l'élaboration d'un outil d'évaluation de la durabilité.

sofies
leading sustainability

 ecometrics

