



Rapport de recherche

2022

Open Access

This version of the publication is provided by the author(s) and made available in accordance with the copyright holder(s).

Économies d'énergie réelles pour plus de 1000 cas de rénovations de bâtiments à Genève

Grandjean, Basile; Novoa-Herzog, Ruben; Schneider, Stefan; Hollmuller, Pierre

How to cite

GRANDJEAN, Basile et al. Économies d'énergie réelles pour plus de 1000 cas de rénovations de bâtiments à Genève. 2022

This publication URL: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:164268>



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

INSTITUT DES SCIENCES
DE L'ENVIRONNEMENT

Economies d'énergie réelles pour plus de 1000 cas de rénovations de bâtiments à Genève

*Rapport de recherche
réalisé dans le cadre du Partenariat SIG – UNIGE*

Basile GRANDJEAN
Rubén NOVOA-HERZOG
Stefan SCHNEIDER
Pierre HOLLMULLER

Octobre 2022

Résumé

Objectif et méthode

Cette étude s'intéresse à la dynamique des rénovations énergétiques sur le canton de Genève, ainsi qu'à leurs effets sur la consommation réelle des bâtiments. Dans cette perspective, elle se base sur une méthodologie d'analyse de données en libre accès issues des :

- autorisations de construire délivrées par l'Etat de Genève ;
- données de consommation annuelle pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire en énergie finale par bâtiment (base de données IDC) ;
- données du cadastre des bâtiments.

Pour exploiter ces différentes sources de données un travail de géomatique a été nécessaire pour lier les données des bâtiments avec celles des autorisations de construire. Ensuite, comme les autorisations de construire ne sont pas étiquetées en fonction de leur ambition énergétique, un procédé se servant de la reconnaissance par mots-clefs a été mis au point pour identifier les travaux à plus-value énergétique. Finalement, un algorithme spécifique a été créé pour quantifier les effets en termes de performances énergétiques à la suite de chaque rénovation (autorisation de construire à plus-value énergétique).

Analyse de la base de données IDC

L'analyse de la base de données IDC (qui inclut une correction climatique pour la partie chauffage) a permis de mettre en évidence un certain nombre de résultats généraux sans se référer aux données des autorisations de construire :

- Pour l'ensemble des bâtiments, la performance énergétique du parc bâti s'améliore de manière tendancielle d'environ 1.0% par année pour la période allant de 2011 à 2019. Cette amélioration s'explique principalement par (i) l'inclusion progressive de nouveaux bâtiments plus performants dans le parc immobilier et par (ii) la baisse de consommation des bâtiments plus anciens ;
- En considérant un échantillon constitué des mêmes bâtiments présents depuis 2011, la baisse tendancielle recule à 0.52% pour les bâtiments résidentiels collectifs et mixtes ;
- Si l'on différencie cette baisse par époque de construction on observe que :
 - Pour les bâtiments construits entre 1991 et 2010, l'évolution de la consommation moyenne est particulièrement stable (tendance linéaire inférieure à 0.1% par année) ;
 - Pour les bâtiments construits avant 1990, la tendance globale à la baisse est de 0.64% par année. Cette baisse est la plus marquée pour les bâtiments construits entre 1961 et 1970 (0.86%) et la moins marquée pour ceux construits entre 1981 et 1990 (0.39%) ;
- La contribution des baisses importantes (plus de 150 MJ/m².an) dans la tendance globale d'amélioration de la performance du parc bâti est la plus visible pour les bâtiments construits entre 1961 et 1970, et presque inexistante pour les bâtiments construits entre 1981 et 1990 ;
- De manière générale la fréquence des baisses de consommation modérées (entre 50 et 150 MJ/m²/an) semble assez peu dépendre de la période de construction.

Analyse de la base IDC en séparant les bâtiments rénovés des bâtiments non rénovés

Les bâtiments résidentiels collectifs et mixtes construits avant 1990 qui n'ont pas fait l'objet de rénovation présentent en moyenne une tendance à la baisse de l'ordre de $0.5 \pm 0.1\%$ par année. Cette tendance varie très peu selon les époques de construction, ce qui illustre le fait qu'une partie des économies d'énergie sont réalisées par :

- des mesures d'optimisation sans toucher à l'enveloppe du bâtiment ;
- le comportement des habitants qui intègrent de plus en plus les questions environnementales ;
- les effets artificiels comme une correction climatique imprécise ;
- les rénovations des chaudières ;
- les effets de comptage (le raccordement sur un CAD diminue la consommation d'énergie finale car le comptage étant effectué en chaleur, puis convertit en énergie finale avec un facteur favorable ; la problématique de l'électricité de pompes à chaleur sur l'air extrait qui n'est pas systématiquement comptabilisée dans l'IDC).

Les bâtiments rénovés présentent une baisse moyenne entre 0.2% et 1.8% par année selon les époques de construction. Ce résultat reflète à la fois la quantité de rénovations et leurs qualités énergétiques. Ainsi, ces baisses moyennes observées varient de manière importante entre les différentes époques de construction de la manière suivante :

- L'effet énergétique des rénovations est peu significatif pour les bâtiments construits après 1970 ;
- L'effet énergétique des rénovations est le plus marqué pour les bâtiments construits entre 1960 et 1970 ;
- Pour les bâtiments construits avant 1970, plus ils sont anciens, moins la baisse est marquée.

Du point de vue de la demande en énergie globale, la rénovation énergétique ne semble par conséquent pas être le principal vecteur d'amélioration de l'efficacité énergétique du parc bâti. En effet, la plus grande partie de l'évolution tendancielle à la baisse de l'ensemble des bâtiments construits avant 1990 (-0.64% par année) est reproduite avec un échantillon qui exclut les bâtiments rénovés (-0.47% par année) comme l'indique la Figure ci-dessous.

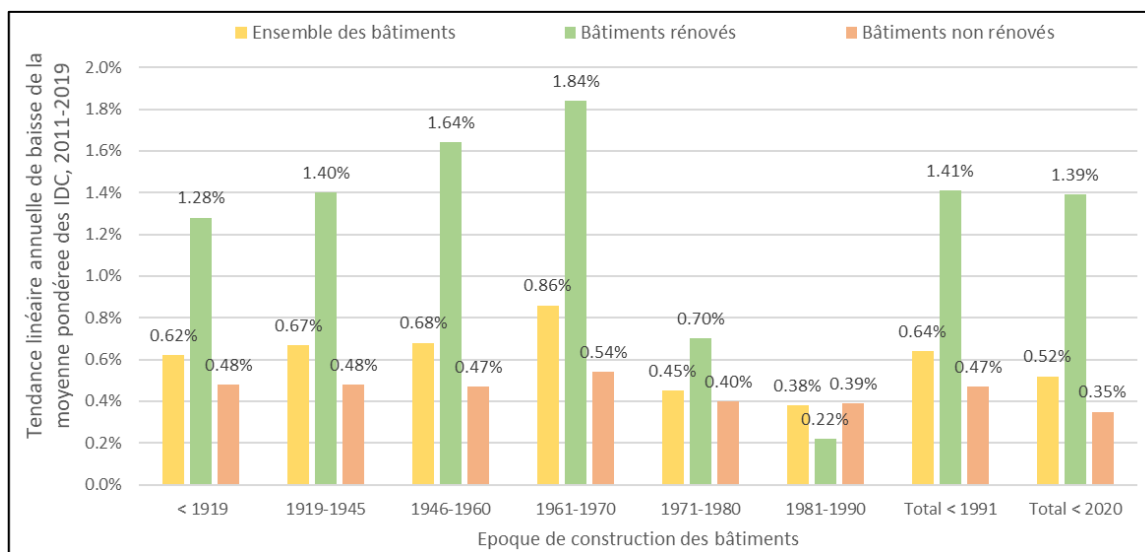


Figure A – Visualisation de la tendance linéaire moyenne de baisse des IDC moyens pondérés par la SRE

A l'échelle du parc bâti, l'effet de la rénovation énergétique peut être estimé comme la différence entre ces deux tendances, soit une contribution de l'ordre de -0.2% par année sur la demande totale en énergie finale. En outre, les baisses tendanciellles sont nettement plus importantes pour les bâtiments identifiés comme « rénovés » (barres vertes), mais représentent seulement une petite partie du parc. Il est à souligner que si le critère de reconnaissance par mots-clefs d'une rénovation à plus-value énergétique était rendu plus contraignant, les baisses tendanciellles de cette catégorie augmenteraient, mais représenteraient une part encore plus faible du parc bâti. Il est également à supposer que cela pourrait éventuellement augmenter la baisse tendancielle dans une moindre mesure des bâtiments classés comme « non rénovés ». En d'autres termes, la manière la plus fiable de mesurer l'effet des rénovations énergétiques à l'échelle du parc bâti consiste à comparer les résultats de l'ensemble des bâtiments avec ceux dont on peut exclure la rénovation, c'est à dire ceux pour lesquels il n'y a pas eu d'autorisation de construire à plus-value énergétique.

Finalement, les résultats concernant les bâtiments rénovés (en vert) sont principalement utiles (i) à titre indicatif afin de mettre en lumière qu'il existe bien un effet mesurable des rénovations sur la consommation et (ii) de manière relative, pour mettre en évidence la variation de cet effet entre les différentes époques de construction.

Effet des rénovations sur l'indice de dépense de chaleur

Dans le but d'analyser l'effet statistique des autorisations de construire sur la consommation des bâtiments, une séparation a été effectuée entre les données des résultats les plus fiables (340 cas) et les reste des cas (1'442) pour lesquels nous avons des doutes (par exemple à cause de certaines données manquantes). Ainsi, il a été constaté qu'en moyenne, la baisse de consommation s'établit à 67.9 MJ/m².an pour les bâtiments rénovés et faisant partie des données les plus fiables. La baisse est un peu plus faible (47.0 MJ/m².an) en considérant l'ensemble des résultats. En outre, plus la consommation d'un bâtiment est élevée avant les travaux, plus l'effet moyen d'une autorisation de construire à plus-value énergétique sur la consommation d'énergie est marqué. A l'inverse, pour les bâtiments dont la consommation est inférieure à 500 MJ/m².an avant les travaux, la baisse d'IDC après les travaux est en moyenne presque insignifiante comme l'illustre la Figure ci-dessous.

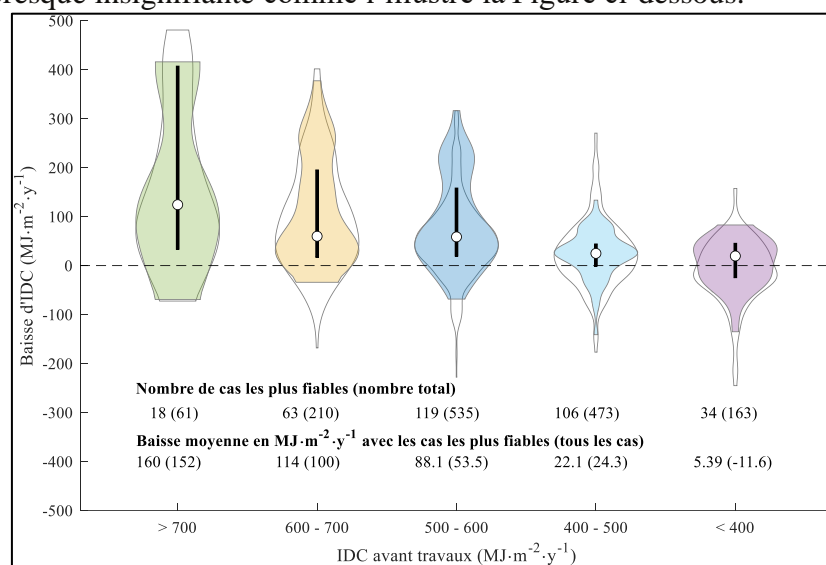


Figure B – Distribution des baisses d'IDC avant rénovation, avec une comparaison entre les cas les plus fiables (en couleur) et l'ensemble des cas (silhouette grise). Pour les cas les plus fiables, la médiane est indiquée par le cercle blanc et, les 27-75 percentiles par les lignes noires verticales

De plus, pour les bâtiments construits entre 1961 et 1970, l'effet des autorisations de construire sur la consommation d'énergie est en moyenne plus marqué et la proportion d'autorisations de construire suivie de baisses de plus de 250 MJ/m².an est significativement plus importante que pour les autres époques de construction. Ensuite, il a été observé que les distributions des IDC sont très proches entre l'échantillon des bâtiments rénovés (IDC avant les travaux) et celui de bâtiments non-rénovés. Cette ressemblance suggère que la consommation d'énergie avant les travaux ne constitue pas un facteur déterminant pour entreprendre une rénovation.

Finalement, il a été estimé un taux de rénovation brut qui est défini par le rapport entre le nombre d'autorisations de construire et le nombre de bâtiments collectifs et mixtes total (quelle que soit la consommation d'énergie après les travaux). Ce taux brut peut être séparé en taux de rénovation ayant permis de réaliser des sauts de classe d'efficacité énergétique effective (selon l'idée des classes CECB étiquetées de A à G). Ainsi, il a été estimé que le taux de rénovation brut s'établit à 1.7% par an sur la période allant de 2010 à 2018. De plus, comme l'indique la Figure ci-dessous, les résultats de l'étude mettent en évidence que les bâtiments construits entre 1961 et 1970 sont proportionnellement les plus rénovés et de manière plus efficace que les autres bâtiments. De plus, il a été estimé que 2.4% de ce parc est concerné chaque année par au moins une autorisation de construire avec un impact énergétique potentiel.

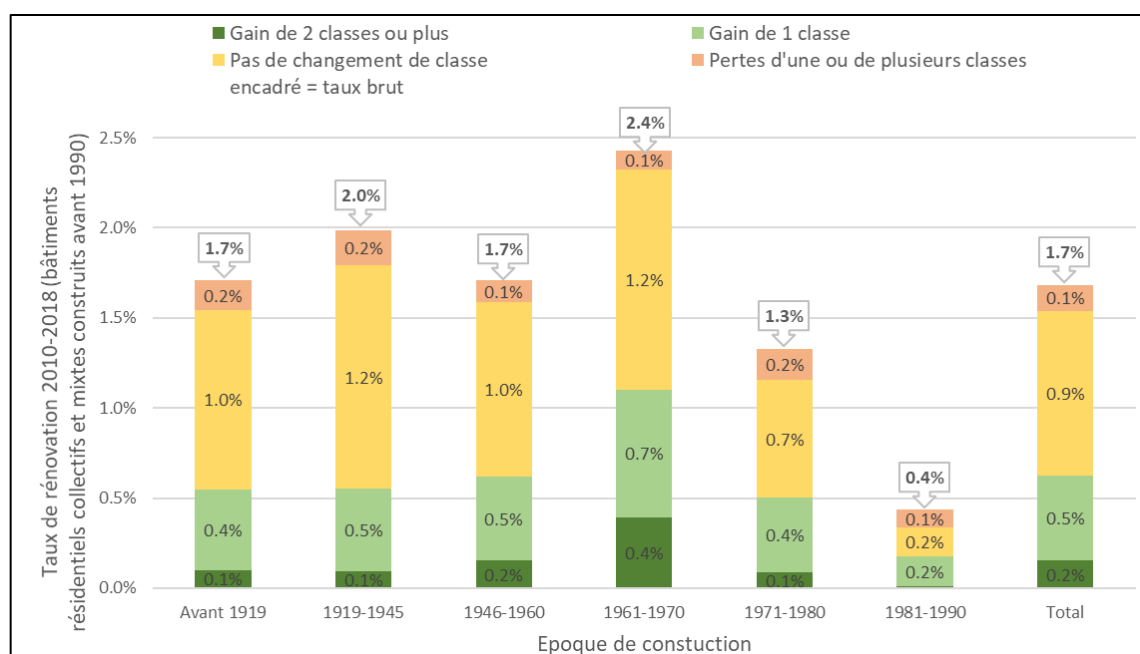


Figure C - Visualisation des taux de rénovations globaux par époques de construction et en fonction de leur impact sur les IDC

A l'opposé, les bâtiments construits entre 1981 et 1990 ne sont presque pas rénovés, avec un taux estimé de 0.4% d'autorisation de construire à plus-value énergétique par bâtiment et par année. Pour ces bâtiments, la tendance à la baisse de la consommation est expliquée uniquement par des mesures non constructives. Par ailleurs, sur l'ensemble des bâtiments, le taux de rénovation énergétiquement efficace est estimé à 0.5% pour une amélioration d'au moins une classe énergétique et de 0.2% pour une amélioration d'au moins deux classes. Ces résultats dépendent des différentes époques de construction : le taux de rénovation énergétiquement efficace est environ deux fois plus élevé pour les bâtiments construits entre 1961 et 1970 que pour les autres époques (1.1% pour une amélioration d'au moins une classe énergétique et 0.5% pour une amélioration d'au moins deux classes).

Table des matières

1.	Introduction	- 1 -
2.	Données utilisées	- 2 -
2.1	Evolution des demandes énergétiques	- 2 -
2.2	Estimation du taux de rénovation.....	- 3 -
3.	Consommation d'énergie thermique des bâtiments.....	- 4 -
3.1	Méthodologie	- 4 -
3.2	Résultats.....	- 4 -
4.	Variation de la consommation d'énergie des bâtiments avec rénovation	- 11 -
4.1	Méthodologie	- 11 -
4.2	Résultats.....	- 14 -
5.	Taux de rénovation des bâtiments résidentiels collectifs et mixtes	- 27 -
5.1	Méthodologie	- 27 -
5.2	Résultats.....	- 29 -
6.	Conclusion.....	- 33 -
7.	Références	- 35 -

Liste des Figures

FIGURE 1 – COMPARATIF ENTRE LA SRE RENSEIGNÉE DANS LA BASE DE DONNÉES IDC ET LES ESTIMATIONS DE L'ÉVOLUTION DE LA SRE.....	- 4 -
FIGURE 2 – EVOLUTION DE L'IDC MOYEN POUR L'ENSEMBLE DES DONNÉES DE LA BASE IDC (ÉCHANTILLON NON CONSTANT ET QUI PREND EN COMPTE L'ARRIVÉE DE BÂTIMENTS NEUFS PLUS PERFORMANTS).	- 5 -
FIGURE 3 – EVOLUTION DE LA MOYENNE PONDÉRÉE PAR LA SURFACE DE L'IDC PAR ÉPOQUE DE CONSTRUCTION D'UN ÉCHANTILLON FIXE DE BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS COLLECTIFS ET MIXTES.....	- 6 -
FIGURE 4 - COMPARAISON DES VARIATIONS D'IDC ENTRE 2011 ET 2019 POUR LES BÂTIMENTS DE 1961 À 1970, DE 1981 À 1990 AVEC CEUX DE 2001 À 2010.....	- 8 -
FIGURE 5 - EVOLUTION DE LA MOYENNE PONDÉRÉE DES IDC POUR L'ENSEMBLE DES BÂTIMENTS (JAUNE), LES BÂTIMENTS AVEC COE (EN BLEU), ET LES BÂTIMENTS NON RÉNOVÉS (EN ORANGE).	- 9 -
FIGURE 6 – APERÇU SYNTHÉTIQUE DES CATÉGORIES ANALYSÉES	- 12 -
FIGURE 7 - REPRÉSENTATION DE LA RECHERCHE DE L'ANNÉE DE VARIATION DE LA CONSOMMATION À PARTIR DE LA DATE DES TRAVAUX	- 13 -
FIGURE 8 - REPRÉSENTATION DE LA DENSITÉ DE DISTRIBUTION DES VARIATIONS D'IDC CONSTATÉES À LA SUITE D'UNE AUTORISATION DE CONSTRUIRE À PLUS-VALUE ÉNERGÉTIQUE. LES CAS LES PLUS FIABLES SONT REPRÉSENTÉS À GAUCHE, ET L'ENSEMBLE DES RÉSULTATS À DROITE.....	- 14 -
FIGURE 9 - EVOLUTION DE LA MOYENNE PONDÉRÉE DES IDC POUR L'ENSEMBLE DES BÂTIMENTS (JAUNE), LES BÂTIMENTS RÉNOVÉS (EN VERT), ET LES BÂTIMENTS NON RÉNOVÉS (EN ORANGE).	- 17 -
FIGURE 10 - DISTRIBUTION DES BAISSSES D'IDC PAR FAMILLES D'IDC AVANT RÉNOVATION, AVEC UNE COMPARAISON ENTRE LES CAS LES PLUS FIABLES (EN COULEUR) ET L'ENSEMBLE DES CAS (SILHOUETTE EN GRIS). POUR LES CAS LES PLUS FIABLES LA MÉDIANE EST INDIQUÉE PAR LE CERCLE BLANC, ET LES 25-75 PERCENTILES PAR LES LIGNES NOIRES VERTICALES.	- 19 -
FIGURE 11 - DISTRIBUTION DES RÉDUCTIONS DES IDC PAR ÉPOQUE DE CONSTRUCTION, AVEC UNE COMPARAISON ENTRE LES DONNÉES LES PLUS FIABLES (EN COULEUR) ET LA TOTALITÉ DES CAS (SILHOUETTE EN GRIS). POUR L'ENSEMBLE DES DONNÉES LES PLUS FIABLES, LA VALEUR MÉDIANE EST INDIQUÉE PAR LE CERCLE BLANC, ET LES 25-75 PERCENTILES PAR LA LIGNE NOIRE VERTICALE.	- 20 -
FIGURE 12 - COMPARAISON ENTRE LES BAISSSES D'IDC À LA SUITE D'UNE AUTORISATION DE CONSTRUIRE DE TYPE « DEMANDE DÉFINITIVE » OU « PROCÉDURE ACCÉLÉRÉE » POUR LES CAS LES PLUS FIABLES	- 21 -
FIGURE 14 – BAISSSE DE L'IDC POUR LES BÂTIMENTS RÉNOVÉS ÉNERGÉTIQUEMENT, SÉPARÉS ENTRE CEUX FAISANT L'OBJET D'UN COE ET LES AUTRES.	- 22 -
FIGURE 14 - COMPARAISON ENTRE LES BÂTIMENTS DE LA CPEG ET LES AUTRES BÂTIMENTS LIÉS À UNE AUTORISATION DE CONSTRUIRE	- 23 -
FIGURE 15 – ECHANTILLON DE L'ÉTUDE « COMPARE REMOVE » : REPRÉSENTATION DES ÉCONOMIES DE CHAUFFAGE RÉALISÉES PAR RAPPORT AUX ÉCONOMIES THÉORIQUES	- 24 -
FIGURE 16 - COMPARAISON ENTRE LA COURBE DE « COMPARE REMOVE » ET LES BAISSSES D'IDC À LA SUITE DES AUTORISATIONS DE CONSTRUIRE À PLUS-VALUE ÉNERGÉTIQUE POUR LES 340 CAS LES PLUS FIABLES. LES ÉCONOMIES THÉORIQUES SONT EXPRIMÉES EN TERMES D'ÉCONOMIES POTENTIELLES SI LA VALEUR LIMITE SIA ÉTAIT VISÉE.	- 25 -
FIGURE 17 - VISUALISATION DES TAUX DE RÉNOVATIONS GLOBAUX PAR ÉPOQUES DE CONSTRUCTION ET EN FONCTION DE LEUR IMPACT SUR LES IDC	- 30 -
FIGURE 18 - VISUALISATION DES TAUX DE RÉNOVATIONS GLOBAUX PAR ÉPOQUES DE CONSTRUCTION ET EN FONCTION DE LEUR IMPACT SUR LES IDC (ÉCHANTILLON DES CAS LES PLUS FIABLES).....	- 31 -

Liste des Tableaux

TABLEAU 1 – NOMBRE DE BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS COLLECTIFS ET MIXTES FAISANT PARTIE DE LA COHORTE	- 7 -
TABLEAU 2 – NOMBRE DE BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS COLLECTIFS ET MIXTE DU PARC IDC CONCERNÉS PAR UN COE	- 10 -
TABLEAU 3 - BAISSSE D'IDC ASSOCIÉE À UNE AUTORISATION DE CONSTRUIRE À PLUS-VALUE ÉNERGÉTIQUE [MJ/m ² .AN]	- 14 -
TABLEAU 4 – INFORMATIONS SUR LES BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS COLLECTIFS ET MIXTES	- 16 -
TABLEAU 5 - TAUX ANNUEL MOYEN DE RÉNOVATION 2010-2018.....	- 29 -
TABLEAU 6 – VALEURS NUMÉRIQUES DES TAUX DE RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUEMENT EFFICACE PAR ÉPOQUE DE CONSTRUCTION ...	- 32 -

Liste des abréviations et des acronymes

APA	Autorisation en procédure accélérée
CAD	Chauffage à distance
CO₂	Dioxyde de carbone
COE	Contrat d'optimisation des chaufferies
CPE	Contrat à la performance
CPEG	Caisse de pension de l'Etat de Genève
DD	Demande définitive
ECS	Eau chaude sanitaire
EGID	Identifiant unique de bâtiment
IDC	Indice de dépense de chaleur
OAC	Office des autorisations de construire
OCSTAT	Office cantonal de la statistique
PDE	Plan directeur de l'énergie
RCI	Règlement d'application de la loi sur les constructions et les installations diverses
RegBI	Registre fédéral des bâtiments et des logements
SITG	Système d'information du territoire à Genève
SRE	Surface de référence énergétique

1. Introduction

Le Conseil d'Etat genevois a adopté le 2 décembre 2020 le Plan directeur de l'énergie (PDE) [1]. Ce document stratégique présente des objectifs de réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) ambitieux au niveau cantonal. En effet, il s'agira de diminuer de 60% les émissions de CO₂ d'ici 2030, par rapport à leur niveau de 1990. Le PDE estime que le taux de rénovation global du parc bâti genevois doit atteindre 2.5%/an afin que la consommation moyenne d'énergie thermique passe de 450 à moins de 350 MJ/m².an.

La revue de littérature qui a été effectuée dans ce travail montre que la plupart des travaux de recherche qui ont été réalisés jusqu'à présent se focalisent essentiellement sur l'analyse de projets de rénovations spécifiques, ainsi que leur suivi de leur performance réelle [2,3]. D'autres études [4,5] ont également été menées à plus large échelle sur la thématique du *performance gap*, c'est-à-dire l'écart entre les performances énergétiques visées et la consommation mesurée après une rénovation.

Le travail de recherche mené en 2014 par Jad Khoury [2] a permis grâce aux autorisations de construire d'établir une première estimation du taux de rénovation cantonal et de son impact énergétique. Toutefois, l'effet sur la consommation d'énergie thermique à large échelle n'a pas été estimé. Dans l'intention d'avoir une vision plus claire à l'échelle cantonale, cette étude vise à estimer le taux de rénovation actuel des bâtiments résidentiels collectifs par époque de construction, ainsi que les économies d'énergies réelles réalisées.

En premier lieu, le chapitre deux explicitera les différentes données utilisées qui sont nécessaires à la présente étude. Ensuite, la méthodologie et les résultats associés seront présentés dans le chapitre trois et quatre. C'est dans ces derniers que sera notamment exposé - l'évolution de la consommation énergétique de l'ensemble du parc bâti genevois ; la variation de la consommation d'énergie après rénovation ; le taux de rénovation sur l'ensemble des bâtiments résidentiels collectifs et mixtes. Pour finir, le dernier chapitre proposera une conclusion sur les différents éléments exposés.

2. Données utilisées

Les données utilisées peuvent être regroupées en deux catégories : celles qui ont permis de calculer l'évolution des demandes énergétiques et celles qui ont permis d'estimer le taux de rénovation des bâtiments résidentiels collectifs et mixtes.

2.1 Evolution des demandes énergétiques

Dans le canton de Genève, les données géoréférencées de demande d'énergie pour la production de chaleur des bâtiments résidentiels collectifs de plus de cinq preneurs sont disponibles publiquement grâce au système d'information du territoire à Genève (SITG) depuis 1990. Cette demande d'énergie est connue sous le nom d'indice de dépense de chaleur (IDC) et représente la consommation d'énergie finale pour la production de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (ECS). Le calcul de la valeur de l'IDC est effectué par des concessionnaires sur la base de relevés de consommation et de la surface de référence énergétique (SRE) du bâtiment, ce qui garantit une certaine fiabilité des données. Il est à noter que cette valeur de l'IDC est donnée en MJ/m².an et comprend une correction climatique. Toute la procédure détaillée du calcul de l'IDC est disponible dans la « Directive relative au calcul de l'indice de dépense de chaleur » [6].

Dans cette étude, seulement les données des IDC entre 2011 et 2019 ont été utilisées car cet intervalle de temps correspond à la période durant laquelle la méthodologie de calcul de l'IDC est restée la même. Des explications sur les changements de méthodes de calcul sont fournies dans l'Annexe A.

Dans la mesure où il était nécessaire d'obtenir des informations complémentaires sur les bâtiments étudiés, les données du cadastre des bâtiments ont également été utilisées. Il s'agit de données géoréférencées qui permettent d'obtenir des informations comme la surface au sol, la hauteur, la période de construction, l'affectation, ainsi qu'un identifiant unique de bâtiment (EGID). Toutefois, les données sur l'époque de construction n'étant pas toujours complète dans le cadastre, il a été nécessaire de les compléter à l'aide des statistiques cantonales des bâtiments et logements qui repose sur le Registre fédéral des bâtiments et des logements (RegBL).

En définitive, pour mener cette étude les couches *shapefiles* suivantes ont été extraites du SITG le 15 mars 2021 :

- Indice de dépense de chaleur des bâtiments – moyenne ;
- Bâtiments hors-sol ;
- Statistique cantonale des bâtiments et logements (Information à l'adresse).

2.2 Estimation du taux de rénovation

En vue de calculer les taux de rénovation, la base de données publique qui répertorie l'ensemble des autorisations de construire délivrées à Genève a été utilisée. Ces données sont également disponibles sur la guichet cartographique SITG, toutefois certaines informations manquantes ont été complétées grâce à la plateforme « SadConsult » qui catalogue le suivi administratif des dossiers des plans d'affectation et des autorisations de construire. Depuis cette plateforme les informations suivantes ont été téléchargées :

- le statut de la procédure d'autorisation (« accepté », « refusé », « en traitement », etc.) ;
- l'intitulé qui décrit sommairement l'objet des travaux, sous forme d'un texte libre rempli par le requérant ;
- les dates de demande et de décision.

Il est important de souligner que plusieurs filtres ont été utilisés afin d'obtenir uniquement les données semblant être pertinentes dans le cadre de cette étude. Le premier filtrage a été effectué sur les statuts administratifs des procédures pour conserver uniquement les projets autorisés et en chantier. En effet, la fin administrative de chantier et la mise à jour des données peuvent prendre du temps. En d'autres termes, certains projets étiquetés comme étant « en chantier » peuvent correspondre dans les faits à des rénovations qui ont déjà été terminées.

Un deuxième filtrage a été réalisé en fonction du type de demande administrative afin d'éliminer les numéros de références qui correspondent à des démolitions, aménagements extérieurs, etc. pour conserver uniquement les dossiers du type « DD » (demande définitive), ou « APA » (autorisation en procédure accélérée). Effectivement, les rénovations avec des modifications d'importance (par exemple « surélévation ») font *a priori* l'objet d'une demande définitive, alors que d'autres travaux de rénovation avec impact énergétique (mais qui ne modifient pas ou peu l'aspect général du bâtiment) peuvent être traité en procédure accélérée. Comme la décision du type de procédure d'autorisation de construire dépend d'autres paramètres que les aspects purement énergétiques, il a été décidé de conserver les deux types de dossiers afin de comparer leur impact énergétique. Par ailleurs, la méthodologie complète pour le traitement des données sera explicitée dans le chapitre 4.1, notamment concernant la catégorisation des bâtiments « rénovés » ou « non rénovés ».

3. Consommation d'énergie thermique des bâtiments

3.1 Méthodologie

La méthodologie qui a été utilisée pour cette partie est très simple car elle a simplement consisté à lier les données du cadastre des bâtiments avec celles de base de données des IDC en se basant sur l'identifiant EGID unique. Dès lors, il a été possible de différencier les bâtiments par période de construction et d'estimer la surface totale chauffée du canton, ainsi que son évolution. L'Annexe A fournit la répartition des données du cadastre en catégorie de bâtiment (type d'affectation), de même que la relation entre la surface brute et la surface chauffée.

3.2 Résultats

3.2.1 Etat des lieux

Tout d'abord, il paraît important de présenter un aperçu général sur l'évolution des surfaces chauffées du canton de Genève. Ainsi, il a été constaté qu'en 2019, les bâtiments de la base de données des IDC représentaient 66% de la surface chauffée totale du canton de Genève (la surface chauffée totale étant estimée à partir du cadastre des bâtiments). Les 34% restants de la surface totale chauffée étant soit des bâtiments résidentiels de moins de cinq logements qui n'ont pas l'obligation de calculer leur IDC chaque année, ou soit des bâtiments n'ayant tout simplement pas renseignés leur consommation énergétique.

La Figure 1 ci-contre illustre l'évolution de la surface totale chauffée (toutes les affectations) avec une consommation énergétique renseignée, en comparaison de l'estimation de la surface totale chauffée cantonale estimée à partir des données du cadastre (détails des calculs en Annexe A).

Il est à noter que la légère baisse constatée depuis 2015 concerne surtout les affectations autres que le résidentiel collectif.

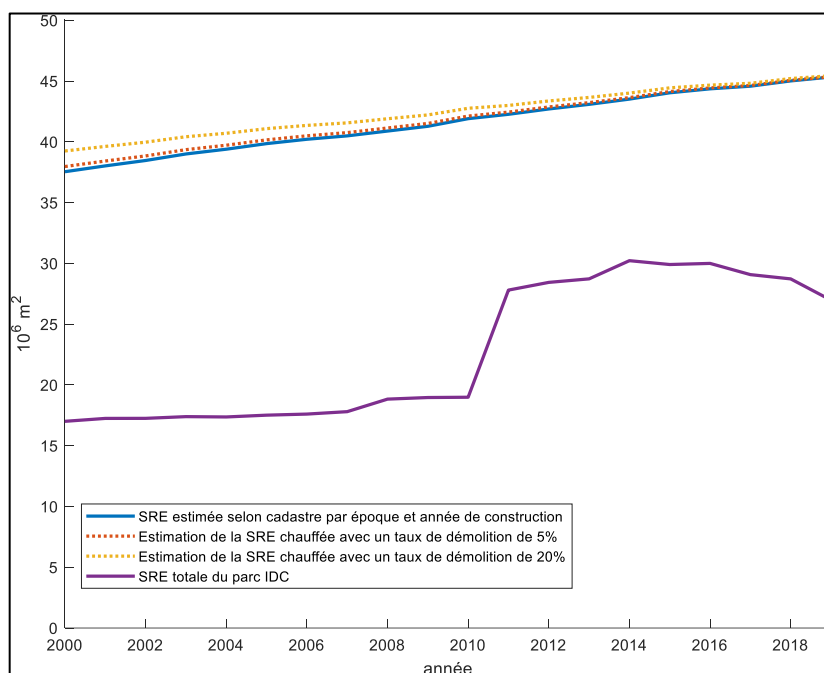


Figure 1 – Comparatif entre la SRE renseignée dans la base de données IDC et les estimations de l'évolution de la SRE

Comme l'indique la Figure 1, la courbe (violette) de l'évolution de la surface totale renseignée annuellement dans la base de données IDC varie. Ces variations s'expliquent principalement par le fait que certains bâtiments ne sont pas systématiquement renseignés chaque année. De plus, dans certains cas, les bâtiments peuvent tout simplement avoir été

démolis, puis reconstruits. Dès lors, la base de données à disposition fournit pour chaque année un échantillon qui fluctue un peu.

Ainsi, l'évolution de la moyenne pondérée pour l'ensemble de la base de données IDC a été représentée dans la Figure 2 ci-dessous.

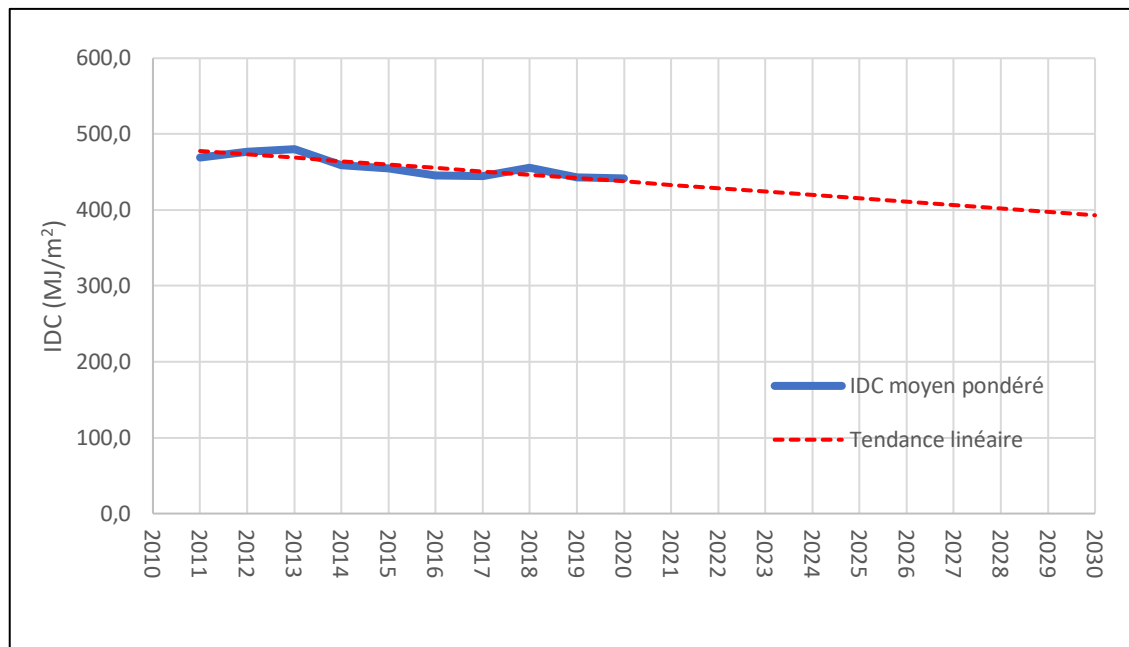


Figure 2 – Evolution de l'IDC moyen pour l'ensemble des données de la base IDC (échantillon non constant et qui prend en compte l'arrivée de bâtiments neufs plus performants).

En calculant la droite de régression de cette évolution de l'IDC moyen (corrigé climatiquement selon la directive IDC [6]), on constate une tendance linéaire baissière de 1.01%. Cette dernière permet de fournir une valeur moyenne de l'IDC avoisinant les 400 MJ/m².an en 2030. Les causes principales de cette tendance baissière sont les suivantes :

1. Amélioration des performances des bâtiments existants (optimisation des réglages, rénovation des chaudières, changement d'agent énergétique) ;
2. Variation de l'échantillon (y compris les nouveaux bâtiments plus récents et plus performants qui s'ajoutent au fur et à mesure dans la base de données) ;
3. Apparition d'autres biais éventuels non chiffrés dans cette étude (méthode de correction climatique, prise en considération de l'électricité des PAC pas systématique, effet de facteurs de conversion qui favorisent une baisse de l'IDC lors d'un nouveau raccordement au CAD).

Par ailleurs, l'Annexe A présente les évolutions des IDC, de la surface chauffée totale et de la consommation globale du canton pour le chauffage (issue des chiffres publiés par l'Office cantonal de la statistique (OCSTAT)) afin de mettre en relation l'évolution de la consommation d'énergie fossile cantonale et celle mesurée pour le parc de bâtiments se trouvant dans la base de données IDC. Une fois renormalisé à climat équivalent, la comparaison fournit les résultats suivants :

- La consommation d'énergie fossile baisse d'environ 0.5% par an selon l'estimation à partir des données IDC (en prenant en considération l'évolution de

la surface chauffée totale, l'amélioration de la performance énergétique et le changement d'agent énergétique) ;

- La consommation d'énergie fossile baisse d'environ 1% par an selon l'estimation à partir des données monitorées de gaz et de mazout fournies par l'OCSTAT.

Cet écart du pourcentage de baisse annuelle de consommation d'énergie fossile pourrait être la conséquence d'une transition plus rapide des habitations individuelles vers des PAC en comparaison aux bâtiments résidentiels collectifs. En effet, il convient de rappeler que l'obligation de renseigner annuellement la base de données IDC ne concerne pas les bâtiments résidentiels avec moins de cinq preneurs de chaleur. De ce fait, la baisse globale de l'énergie fossile estimée à partir de la base de données IDC pourrait être légèrement sous-estimée.

3.2.2 Relation entre les tendances linéaires de l'IDC moyen et les époques de construction

Dans le but de différencier l'effet de la baisse de l'IDC moyen imputable à l'amélioration des performances des bâtiments existants et celle attribuable à la variation de l'échantillon de la base de données IDC, il a été décidé de créer une cohorte fixe de bâtiments dont l'IDC est renseigné chaque année entre 2011 et 2019. La Figure 3 ci-dessous présente l'évolution des IDC par époque de construction de cette cohorte.

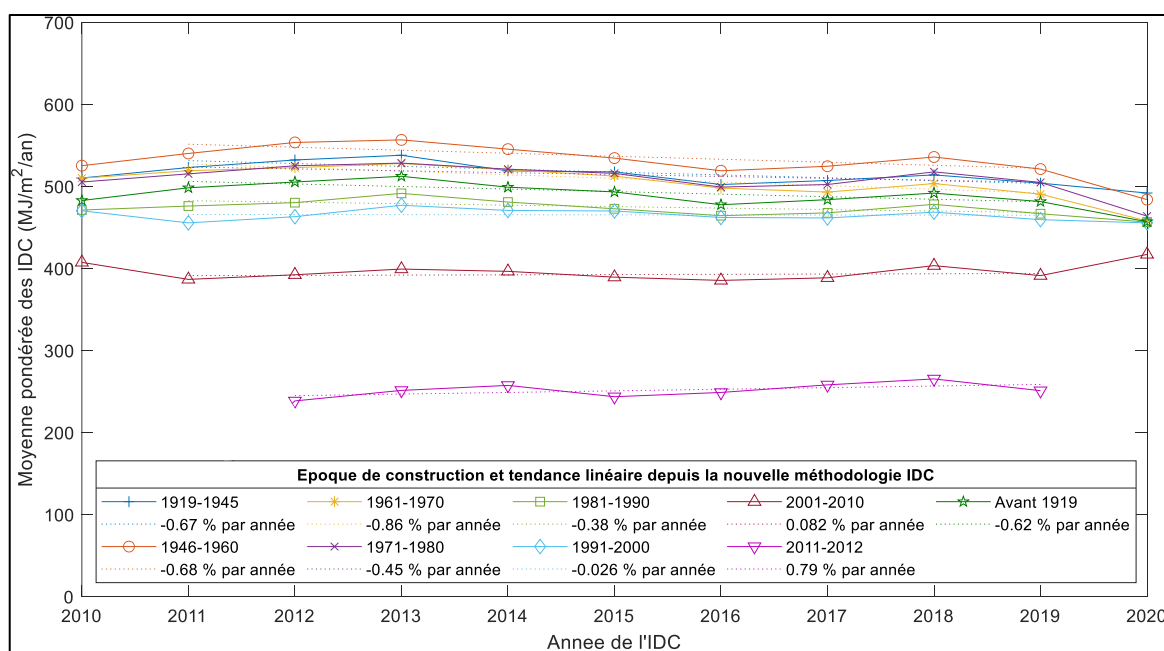


Figure 3 – Evolution de la moyenne pondérée par la surface de l'IDC par époque de construction d'un échantillon fixe de bâtiments résidentiels collectifs et mixtes

En premier lieu, on observe une légère baisse de la consommation d'énergie finale par m^2 entre 2011 et 2019 pour les bâtiments construits jusqu'en 2010. Il est important de souligner que pour les bâtiments construits en 2011 et 2012, la tendance linéaire a été calculée uniquement depuis 2012. Dès lors, on peut constater une hausse de 0.79% des IDC. Toutefois, il est nécessaire de prendre ce résultat avec précaution étant donné le faible nombre de bâtiments ($n=82$) pour cette période de construction. De plus, pour rappel, la condition de sélection pour rentrer dans la cohorte est que les valeurs de l'IDC soient complètement renseignées entre 2011 et 2019 or, pour cette époque de construction (2011-2012), la condition a été assouplie. En effet, pour cette période de construction, les bâtiments avec des données IDC complets entre 2012 et 2019 ont été pris en compte et la droite de

régression a été calculée à partir de 2012 (au lieu de 2011). Pour toutes les autres époques de construction, le nombre de bâtiments de la cohorte est présenté dans le Tableau suivant :

Tableau 1 – Nombre de bâtiments résidentiels collectifs et mixtes faisant partie de la cohorte

<i>Base de données IDC, 2019</i>				
Période de construction	IDC ^a [MJ/m ² .an]	SRE	Part de chaleur	Nombre ^b
< 1919	480.6	14.4%	14.7%	1'742
1919-1945	502.7	8.2%	8.8%	918
1946-1960	521.3	12.2%	13.5%	1'509
1961-1970	490.0	18.8%	19.7%	1'667
1971-1980	503.9	14.0%	15.1%	1'400
1981-1990	466.7	8.1%	7.9%	855
Total < 1991	494.8	75.7%	79.7%	8'091
Total < 2020	468.8	100%	100%	10'646

^a Moyenne des IDC pondérée par la SRE

^b Nombre de bâtiments avec des données IDC complètes entre 2011 et 2019

En deuxième lieu, lorsque l'on prend en considération toutes les époques de construction confondues, la tendance linéaire est une baisse de 0.52% par année (ou 0.64% pour l'ensemble des bâtiments construits avant 1990 – c'est-à-dire potentiellement rénovés). Ainsi, à partir de ce résultat, il paraît cohérent de penser qu'environ la moitié de la baisse moyenne annuelle (1.01%) de consommation d'énergie fossile à l'échelle cantonale s'expliquerait par l'amélioration des IDC des bâtiments existants. L'autre moitié de cette baisse de consommation serait donc engendrée par l'inclusion de nouveaux bâtiments plus performants dans le calcul.

En troisième lieu, on observe que la tendance linéaire baissière la plus importante est calculée pour les bâtiments construits entre 1961 et 1970 et s'établit à 0.86% par an. En effet, ces bâtiments ont atteint un âge de cinquante ans sur la période des IDC considérée, ce qui a probablement généré un nombre important de rénovations énergétiques. Il est également à noter qu'il s'agit de la période de construction où la consommation d'énergie est la plus grande (14% de l'énergie totale des bâtiments de la base IDC) en raison du grand nombre de bâtiments construits à cette époque.

En quatrième lieu, il a été constaté que la consommation des bâtiments construits entre 1991 et 2010 est particulièrement stable puisque son évolution tendancielle correspond à une baisse inférieure à 0.1% par année. Dès lors, on peut considérer que ces bâtiments récents ne font probablement pas encore l'objet de rénovations énergétiques, mais également de peu

d'optimisations énergétiques telles que des contrats d'optimisation énergétique (COE) ou autres. En revanche, pour les bâtiments construits entre 1981 et 1990, la baisse de la consommation est légèrement plus marquée vu qu'elle atteint 0.38% par année. Toutefois, pour ces bâtiments il reste encore *a priori* dix à vingt ans pour arriver à une échéance importante de rénovation. Par conséquent, il est possible de supposer que cette baisse est vraisemblablement due à des améliorations techniques, et encore peu à des mesures constructives.

Dans l'intention d'illustrer et d'expliquer la légère baisse de 0.38% par année pour la période allant de 1981 à 1990 et celle de 0.86% pour la période allant de 1961 à 1970, la distribution des variations d'IDC de cette période de construction a été superposée avec celles de la période de construction allant de 2001 à 2010 dont l'évolution de la moyenne de l'IDC est particulièrement stable (cf. Figure 4).

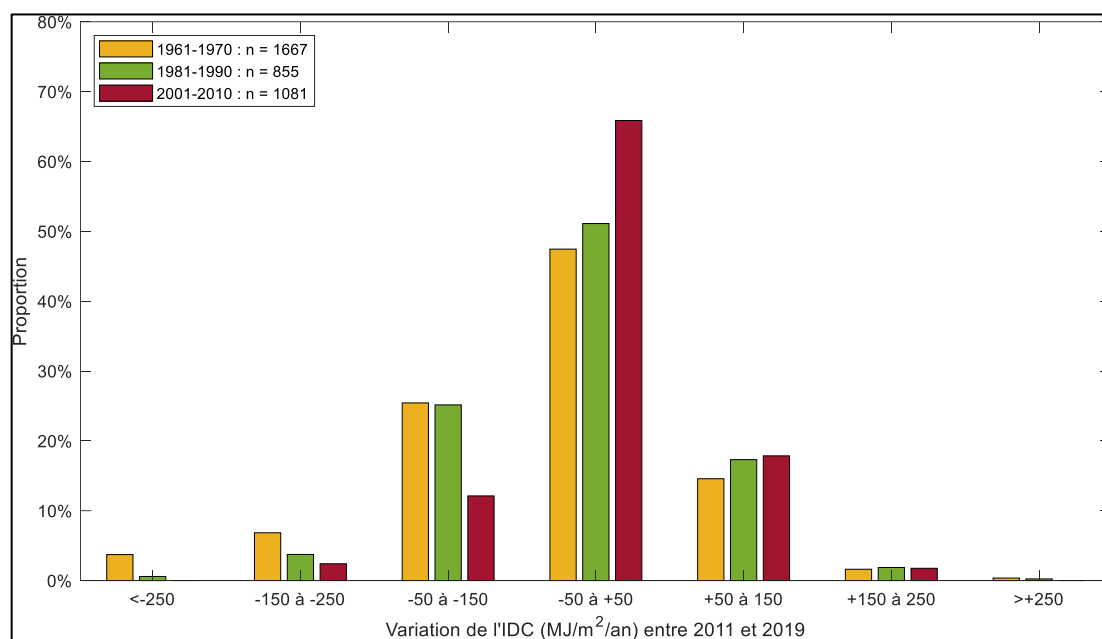


Figure 4 - Comparaison des variations d'IDC entre 2011 et 2019 pour les bâtiments de 1961 à 1970, de 1981 à 1990 avec ceux de 2001 à 2010

En effet, près de 70% de la distribution des variations des IDC des bâtiments construits entre 2001 et 2010 se situent entre -50 et +50 MJ/m².an. Ces petites variations ne sont pas étonnantes dans la mesure où des petites fluctuations de la consommation sont normales dans la vie d'un bâtiment. De plus, il est également possible qu'il y ait eu des éventuelles corrections du calcul de l'IDC (clef de répartition, SRE, etc.). En revanche, on constate que la distribution des variations des IDC des bâtiments de la période de construction de 1961 à 1970, ainsi que celle de 1981 à 1990 est sensiblement différente. Cet écart met en évidence d'autres types de variations de l'IDC qui sont probablement le reflet d'actions systématiques.

La variation des IDC des bâtiments construits entre 1981 et 1990 se distingue de celle des bâtiments construits entre 2001 et 2010 principalement par une proportion plus importante de baisse entre 50 et 150 MJ/m².an. Cette baisse de l'IDC est un peu plus marquée et se situe à 13.9 MJ/m².an sur huit ans. Ramené en pourcentage, ce résultat est de -0.37% par an en moyenne, ce qui correspond avec la tendance linéaire de -0.38% (cf. Figure 3). Par ailleurs, il est intéressant de constater que pour cette époque de construction, très peu de bâtiments ont connu une baisse très importante de leur consommation (seulement 0.07% avec une baisse supérieure à 250 MJ/m².an). Tout porte donc à croire que très peu de rénovations énergétiques globales ont été réalisées pour les bâtiments de cette période de construction et

que la tendance à la baisse de 0.38% par année s'explique par les baisses se situant entre 50 et 150 MJ/m².an. Ces dernières, correspondent en grande partie à des mesures d'optimisations ou d'améliorations ponctuelles.

Enfin, la baisse moyenne pour les bâtiments construits entre 1961 et 1970 est de loin la plus haute, avec une valeur de 31.7 MJ/m² en huit ans. De surcroît, les baisses d'IDC sont plus nombreuses dans une fourchette entre 50 et >250 MJ/m².an par rapport aux bâtiments de la période 2001-2010, ce qui met en évidence l'impact significatif des rénovations énergétiques globales sur la baisse moyenne calculée. En effet, sur les 1'667 bâtiments de cette période de construction, 62 bâtiments (3.7%) ont vu leur IDC baisser de plus de 250 MJ/m².an. Ce résultat peut également servir de premier indicateur du taux de rénovation énergétique réellement efficace¹ puisqu'il se base uniquement sur les données de la base IDC et ne fait pas intervenir les autorisations de construire. L'Annexe D présente les graphiques de la distribution de la variation des IDC pour l'ensemble des époques de construction.

3.2.3 Relation entre les tendances linéaires de l'IDC moyen et le programme d'optimisation des chaufferies ECO21

Les bâtiments qui participent au programme d'optimisation des chaufferies (COE) des SIG présentent de manière générale une baisse tendancielle de l'IDC moyen légèrement supérieure au reste du parc, en particulier vis-à-vis des bâtiments non rénovés (cf. Figure 5).

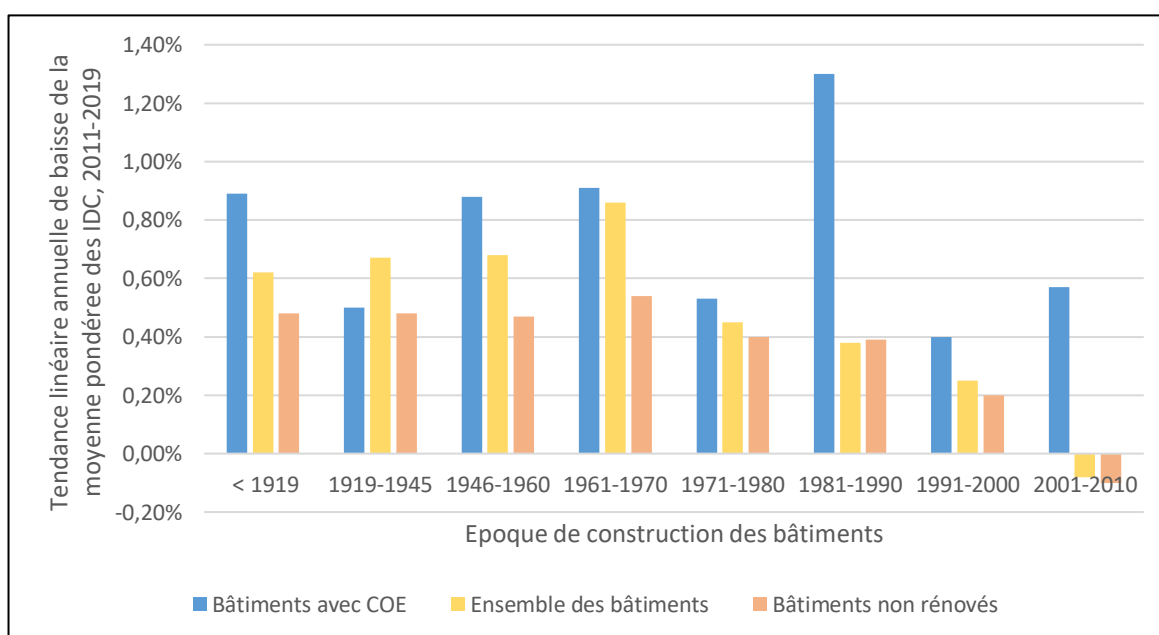


Figure 5 - Evolution de la moyenne pondérée des IDC pour l'ensemble des bâtiments (jaune), les bâtiments avec COE (en bleu), et les bâtiments non rénovés (en orange).

L'effet de ce programme est particulièrement marqué pour les bâtiments construits entre 1981 et 1990 qui ne sont encore pas concernés par des rénovations importantes. Toutefois, les comparaisons entre les bâtiments avec ou sans COE doivent être faites avec prudence car l'ensemble du parc IDC et les bâtiments avec COE ne sont peut-être pas rénovés de manière équivalente (par exemple un COE pourrait être initié pour baisser la consommation à court terme, alors qu'une rénovation ne va intervenir qu'à moyen ou long terme, et ainsi les bâtiments avec COE pourraient être moins rénovés que les autres). De plus, la distribution des bâtiments concernés par un COE par époque de construction diffère

¹ La notion de taux de rénovation efficace sera explicitée dans la méthodologie du chapitre 5.

à celle du parc IDC (cf. Tableau 2). Une analyse complémentaire mériterait d’être effectuée pour quantifier ces hypothèses, et évaluer plus finement ces biais potentiels.

Tableau 2 – Nombre de bâtiments résidentiels collectifs et mixte du parc IDC concernés par un COE

Période de construction	Nombre d’EGID		
	COE	Parc IDC	Part du parc IDC
Avant 1919	107	1'742	6%
1919-1945	57	918	6%
1946-1960	221	1'509	15%
1961-1970	204	1'667	12%
1971-1980	163	1'400	12%
1981-1990	108	855	13%
1991-2000	183	1'451	13%
2001-2010	114	1'081	11%
2011-2020	0	23	0%

Les bâtiments les plus anciens (avant 1919), présentent également des résultats intéressants d’optimisation. Pour ces derniers, il est vraisemblable que les rénovations énergétiques soient souvent contraintes par des questions patrimoniales, et que l’optimisation représente ainsi un potentiel important d’économies d’énergie à court ou à moyen terme.

4. Variation de la consommation d'énergie des bâtiments avec rénovation

4.1 Méthodologie

4.1.1 Traitement des autorisations de construire :

Dans le chapitre traitant des données utilisées dans cette étude, la partie 2.2 « Estimation du taux de rénovation » a permis au lecteur de connaître les premiers filtres d'extraction des données qui ont été utilisés sur les demandes d'autorisation de construire. Toutefois, afin de déterminer si un impact sur la consommation d'énergie devrait être attendu après les travaux de rénovation, un tri plus fin sur les dossiers des autorisations de construire a été effectué. Cette sélection a été réalisée au moyen d'une reconnaissance par mots-clefs (ou combinaison de mots-clefs) afin d'isoler les dossiers engendrant un impact énergétique ou non. Ainsi, le filtre utilisé contient un total de 250 mots-clefs ou combinaisons, par exemples : « isolation thermique » pour un classement avec impact énergétique, et « antenne de téléphonie mobile » pour un classement non énergétique. Par conséquent, il a été possible d'éliminer toutes les demandes d'autorisation de construire ayant traits aux travaux de rénovation ou de réaménagement, ce qui constituent la majorité des demandes d'autorisation de construire. Tous les détails du filtrage sont explicités dans l'Annexe B.

Il convient de souligner que cette approche de classement par mots-clefs présente quelques limites. En effet, certaines rénovations énergétiques peuvent potentiellement ne pas être considérées si l'intitulé de la demande d'autorisation de construire est peu précis, que des mots-clefs soient tout simplement manquants dans le filtre ou que l'orthographe est incorrecte. La précision de la classification est effectivement limitée par la description indiquée par le requérant. Il faut savoir qu'une fois le filtrage effectué, 884 autorisations de construire sur 24'301 entrées analysées restent indéterminées, c'est-à-dire qu'elles ne seront pas clairement identifiées comme catégorie énergétique ou non énergétique. Toutefois, en les parcourant visuellement, il a été constaté qu'une infime minorité aurait pu être cataloguée comme ayant un impact énergétique. De sorte que les résultats de l'étude ne sont que très légèrement impactés par ces quelques cas qui ont échappés au filtrage.

A l'inverse, il est plus probable que certains dossiers classés avec un impact énergétique potentiel correspondent à des travaux de rénovation ou d'entretien courant sans réelles plus-values énergétique, car la description donnée par l'intitulé du dossier ne comprend aucune indication sur la consommation d'énergie attendue après travaux. Cette information est uniquement disponible dans les formulaires déposés auprès de l'administration et devrait donc être consultée manuellement. Pour cette raison, la présente étude se concentre uniquement sur les économies d'énergie finale réalisées et non pas sur l'écart de performance.

4.1.2 Lien entre autorisation de construire et bâtiment :

Pour chaque autorisation de construire les coordonnées géographiques sont connues, mais il n'y a malheureusement pas de lien direct avec les bases de données des bâtiments du cadastre. En conséquence, il a été nécessaire de créer une relation probable entre chaque autorisation de construire et un bâtiment (identifié par un numéro EGID) à l'aide du logiciel *opensource* QGIS.

Pour chaque autorisation de construire, un point (forme en format *shapefile*) a été créé aux coordonnées géographiques connues. Puis, pour chacun d'entre eux, l'opération spatiale suivante de vérification a été réalisée : est-ce que le point est situé à l'intérieur d'un polygone de bâtiment ? Si oui (environ la moitié des cas), le point représentant l'autorisation de construire est associé au numéro EGID du polygone du bâtiment. Si non, un calcul de la distance entre le point et les polygones des bâtiments à proximité est effectué afin d'associer le point au bâtiment le plus proche. Il est à noter que dans certains cas, si la distance est trop importante, cette association peut potentiellement être erronée. De façon à limiter cette erreur potentielle il a été décidé d'éliminer tous les points situés à une distance supérieure à deux mètres du polygone du bâtiment le plus proche. Conséquemment, environ 5% des autorisation de construire ont été éliminées, ce qui pourrait mener à une légère sous-estimation du taux de rénovation (cf. Annexe C). Toutefois, étant donné que l'ordre de grandeur du taux de rénovation est au pourcent, une élimination de même 10% des autorisations de construire ne modifiera pas de manière significative les résultats finaux.

La Figure 6 ci-dessous offre une vue synoptique qui définit les éléments principaux et présente les données utilisées pour la présente étude.

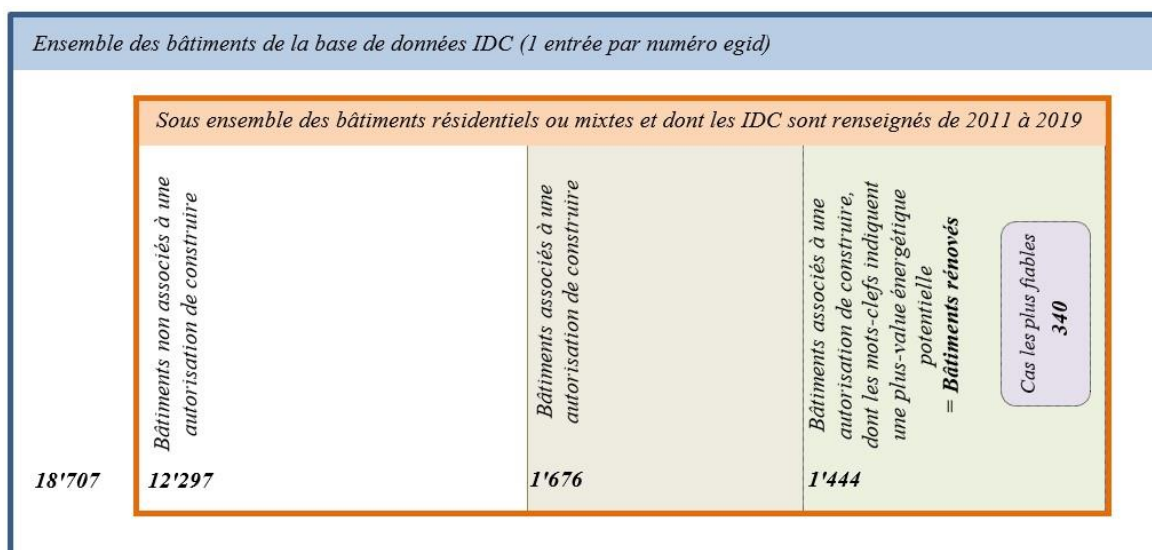


Figure 6 – Aperçu synthétique des catégories analysées

4.1.3 Variation de la consommation d'énergie après rénovation

Grâce aux outils de géomatique il a été possible d'établir une relation entre un bâtiment et une autorisation de construire. A partir de cette correspondance, un algorithme pour rechercher la variation de la consommation d'énergie du bâtiment après les travaux a été créé. Pour ce faire, il détermine pour quelle année n , proche de l'année d'autorisation, la consommation d'énergie a varié de manière la plus significative. Il est à noter que la plus petite valeur de n considérée est d'une année avant la décision d'autorisation du permis de construire. En effet, il arrive parfois que des demandes complémentaires sont effectuées en cours de route, engendrant une date d'obtention du permis finale postérieure à la fin des travaux. A l'inverse, la valeur maximale de n a été fixée à trois ans après la date de demande afin de correspondre au délai légal de deux ans pour la réalisation des travaux, et d'un an pour que les économies d'énergie deviennent perceptibles. En outre, la prise en considération d'une période plus longue pourrait engendrer que l'algorithme pourrait avoir tendance à détecter des variations de consommation sans lien avec les travaux réalisés (changement d'agent énergétique, de clef de répartition, de concessionnaire et autres action postérieures).

Toutefois, dans certains projets, des mesures d'optimisation après rénovation (réglages et optimisation progressive sur plusieurs saisons de chauffe) peuvent prendre plus de temps avant d'atteindre une situation optimale. Par conséquent, il est possible que dans certains cas, l'algorithme sous-estime les économies d'énergie réalisées.

Ainsi, l'année n qui représente donc l'année la plus probable du changement de consommation d'énergie est obtenue en maximisant la fonction objective suivante :

$$f(n) = \left(\overline{IDC}_{avant}(n) - \overline{IDC}_{après}(n) \right)^2 \quad (1)$$

Avec $\overline{IDC}_{avant}(n)$ et $\overline{IDC}_{après}(n)$ qui représentent les IDC moyens sur trois ans (respectivement avant et après) l'année des travaux (cf. Figure 7).

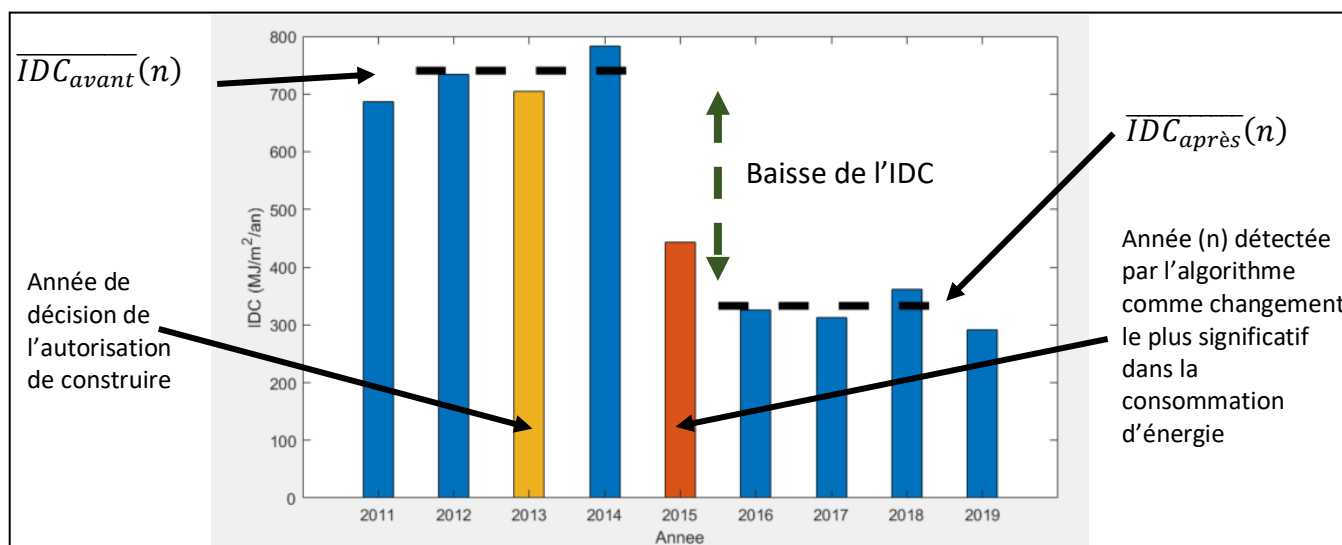


Figure 7 - Représentation de la recherche de l'année de variation de la consommation à partir de la date des travaux

Ensuite, il a été attribué une étiquette de qualité des données aux résultats du calcul de variation de la consommation d'énergie. L'algorithme a ainsi traité un nombre total de 1'444 cas, ce qui correspond au nombre de bâtiments résidentiels collectifs (ou mixtes) qui ont obtenu une autorisation de rénovation à plus-value énergétique après 2010 et dont l'IDC est renseigné. Les résultats de l'algorithme paraissent fiables dans 340 cas (24%) et soulèvent certains doutes dans les 1'104 cas restants. Les incertitudes sur la qualité des données peuvent être liées à différents facteurs :

- Les trois valeurs de l'IDC avant ou après travaux ne sont pas disponibles – généralement lorsque l'année du changement de consommation est proche de 2011 ou de 2019. Dans les cas où il n'y a pas trois valeurs d'IDC disponibles (avant ou après l'année de changement), l'année de changement (en rouge dans la Figure 6) peut être utilisée pour le calcul de la moyenne, mais le résultat est catégorisé comme potentiellement moins fiable. Dans les cas où seule une valeur d'IDC est disponible, il a été décidé de ne pas les prendre en considération car l'incertitude est trop grande ;
- Erreur dans la donnée ou trop grande fluctuation de la valeur de l'IDC. Afin d'écartier cette possibilité, l'algorithme calcul la différence entre la valeur moyenne des IDC deux ans avant travaux et la moyenne des deux derniers IDC connus et il compare ce résultat avec celui obtenu avec l'équation (1). Si la

différence est supérieure à l'écart-type des différences sur l'ensemble de l'échantillon, le résultat est classé comme potentiellement moins fiable ;

- **Changement d'agent énergétique.** Si un tel changement a eu lieu en parallèle de la rénovation, il est possible que la variation de consommation d'énergie soit influencée (différence de rendement des installations ou coefficient de conversion de la directive IDC). Par conséquent, les cas où un changement d'agent énergétique s'est produit ont également été classés comme moins fiables.

4.2 Résultats

4.2.1 Impact énergétique des rénovations estimé à partir des autorisations de construire

Le Tableau ci-dessous présente les résultats des variations d'IDC constatées à la suite d'autorisations de construire pour les bâtiments résidentiels et mixtes obtenus avec l'algorithme décrit dans la méthodologie. Pour les autres affectations, l'interprétation des résultats qui seraient obtenus à l'aide de la même méthode serait beaucoup plus délicate. En effet, le changement d'activité commerciale ou industrielle avant et après travaux pouvant influencer la consommation de manière plus significative que les travaux de rénovation énergétique eux-mêmes. C'est notamment pour cette raison que cette étude se centre sur les bâtiments d'habitation et mixtes.

Tableau 3 - Baisse d'IDC associée à une autorisation de construire à plus-value énergétique [$\text{MJ}/\text{m}^2.\text{an}$]

	Moyenne	Médiane	Dév. standard	9 ^e décile	1 ^{er} décile
Données les plus fiables (340 cas)	67.9	42.0	98.3	233.7	-31.7
Toutes les données (1'444 cas)	47.0	36.2	92.7	157.7	-45.7

Les résultats sont présentés à la fois sur la totalité des cas et sur ceux pour lesquels notre algorithme a jugé les résultats les plus fiables. La distribution des baisses d'IDC est représentée dans la Figure 8 suivante. Cette forme de représentation offre une alternative intéressante aux « box plots » ou histogrammes plus répandus.

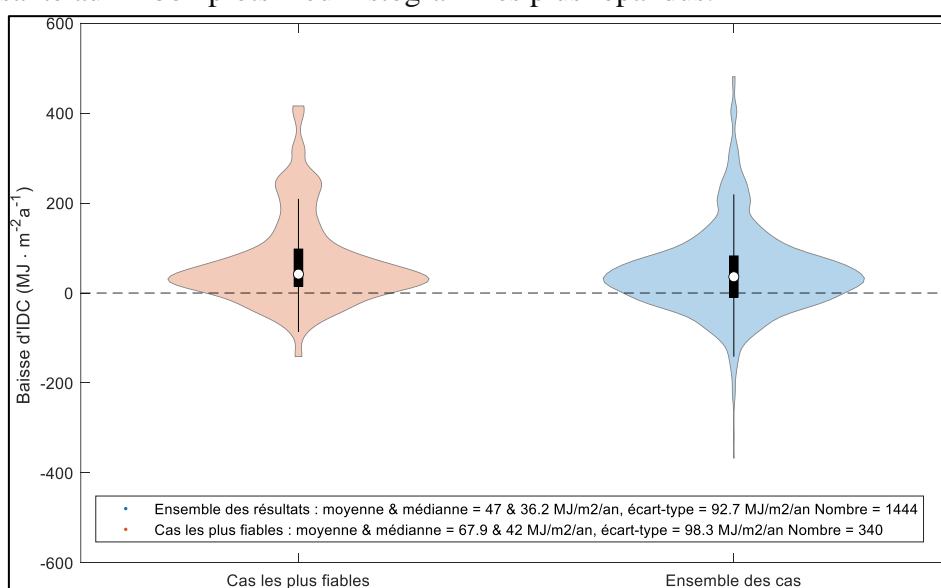


Figure 8 - Représentation de la densité de distribution des variations d'IDC constatées à la suite d'une autorisation de construire à plus-value énergétique. Les cas les plus fiables sont représentés à gauche, et l'ensemble des résultats à droite.

On constate que pour les cas (340) où les données sont jugées les plus fiables par l'algorithme, la réduction moyenne d'IDC observée ($-67.9 \text{ MJ/m}^2.\text{an}$) est un peu plus importante que sur la totalité des données ($-47.0 \text{ MJ/m}^2.\text{an}$). Cette différence de baisse de l'IDC entre ces deux ensembles de données peut potentiellement être expliquée par le fait que dans les cas les plus fiables, les IDC sont moyennés sur trois années après les travaux alors que la durée minimale pour les données moins fiables est de deux années à partir du changement constaté, sans année de transition. En effet, une moyenne calculée sur plus d'années peut éventuellement laisser plus de temps de constater les effets de mesures d'optimisation.

En outre, on observe que les rénovations énergétiques particulièrement efficaces, c'est-à-dire celles suivies d'une baisse d'IDC supérieure à $250 \text{ MJ/m}^2.\text{an}$ représentent seulement 3.5% des rénovations à plus-value énergétique ou 6.5% si l'on considère uniquement les données les plus fiables. A l'inverse, 29% des autorisations de construire sont suivies par une augmentation de l'IDC ou 21% en ne considérant que les données les plus fiables.

La fiabilité de ces résultats est en partie liée à la qualité des données de base, mais également à l'interprétation automatique de cette qualité par l'algorithme. Toutefois, la différence entre les deux ensembles de données représente une information utile et peut servir d'analyse de sensibilité des résultats. Pour cette raison, le présent rapport exposera les résultats des deux ensembles de données à titre de comparaison. En effet, un écart conséquent peut traduire une sensibilité importante, si bien que les valeurs doivent être interprétés avec précaution. A titre d'exemple, le fait que les rénovations donnant lieu à une baisse d'IDC supérieure à $250 \text{ MJ/m}^2.\text{an}$ soit de 6.5% ou 3.5% selon la sélection des données permet d'estimer le taux des rénovations efficaces autour de 5% du total des autorisations de construire. Bien que la précision puisse être encore améliorée, il s'agit là d'un premier résultat important.

Pour pouvoir donner une valeur fiable au pourcent près il faudrait donc améliorer la fiabilité du calcul et du traitement des données. On peut citer par exemples comme pistes d'amélioration possibles – prise en considération d'une période temporelle plus longue (ce qui pourrait être fait d'ici quelques années) ; vérification manuelle des résultats sur la catégorisation de la précision des données ; affiner le filtre sur la fiabilité qui, pour cette étude, prend en considération plusieurs critères de doutes (à savoir : le changement d'agent énergétique, le manque de données, la probabilité d'une surélévation de bâtiment sans recalcul de la SRE et divergence des méthodes de calcul de baisse de la consommation). A titre informatif, une dizaine de résultats issus des sets de données classés fiables ou moins fiables sont fournis dans l'Annexe E. Le lecteur peut ainsi mieux visualiser le fonctionnement de l'algorithme.

4.2.2 Relation entre les tendances linéaires de l'IDC moyen et les bâtiments ayant fait l'objet d'une rénovation

Il paraît important de présenter les résultats de la variation de la consommation d'énergie par période de construction, tout en faisant la distinction entre les bâtiments rénovés et non rénovés. Le but étant d'établir une relation entre les tendances linéaires de l'IDC moyen et les bâtiments ayant fait l'objet d'une rénovation.

Ainsi, le Tableau 4 suivant résume les résultats de variation de la consommation d'énergie pour la période 2011-2019 pour les bâtiments résidentiels collectifs et mixtes construits avant 1990. De plus, les tendances linéaires de l'évolution de l'IDC par période de construction présentées dans le sous-chapitre « 3.2.2 Relation entre les tendances linéaires de l'IDC moyen et les époques de construction » sont comparées avec celles obtenues en séparant les bâtiments ayant fait l'objet d'une autorisation de construire avec impact énergétique potentiel ou non.

Tableau 4 – Informations sur les bâtiments résidentiels collectifs et mixtes

Base de données IDC, 2019					Tendance linéaire 2011-2019			
Période de construction	IDC ^a (MJ/m ² .a)	SRE	Part de chaleur	Nombre ^b	Total ^c (% y ⁻¹)	avec ER ^c (% y ⁻¹)	% avec ER	sans ER ^c (% y ⁻¹)
< 1919	480.6	14.4%	14.7%	1742	-0.62%	-1.28%	15%	-0.48%
1919-1945	502.7	8.2%	8.8%	918	-0.67%	-1.40%	18%	-0.48%
1946-1960	521.3	12.2%	13.5%	1509	-0.68%	-1.64%	16%	-0.47%
1961-1970	490.0	18.8%	19.7%	1667	-0.86%	-1.84%	23%	-0.54%
1971-1980	503.9	14.0%	15.1%	1400	-0.45%	-0.70%	13%	-0.40%
1981-1990	466.7	8.1%	7.9%	855	-0.38%	-0.22%	5.6%	-0.39%
Total < 1991	494.8	75.7%	79.7%	8091	-0.64%	-1.41%	16%	-0.47%
Total < 2020	468.8	100%	100%	10646	-0.52%	-1.39%	13%	-0.35%

^a Moyenne des IDC pondérée par la SRE.
^b Nombre de bâtiments avec des données IDC complètes sur 2011-2019
^c Tendance linéaire des IDC moyens pondéré sur la période de 9 ans : Ensemble des bâtiments (Total); Bâtiments rénovés = associés à une autorisation de construire avec impact énergétique supposé (avec ER); Bâtiments non rénovés (sans ER).

La séparation par période de construction les tendances linéaires des IDC moyens entre les bâtiments rénovés ou non rénovés a permis d'observer l'influence à large échelle des autorisations de construire sur la baisse de consommation d'énergie du parc bâti et que cette baisse dépend nettement de la période de construction. En effet, hormis pour la période de construction 1981-1990, les baisses de consommation sont systématiquement plus importantes dans les bâtiments associés à une autorisation de construire. Il s'agira donc d'essayer d'expliquer ce phénomène.

La Figure 9 suivante permet de représenter graphiquement ces tendances linéaires.

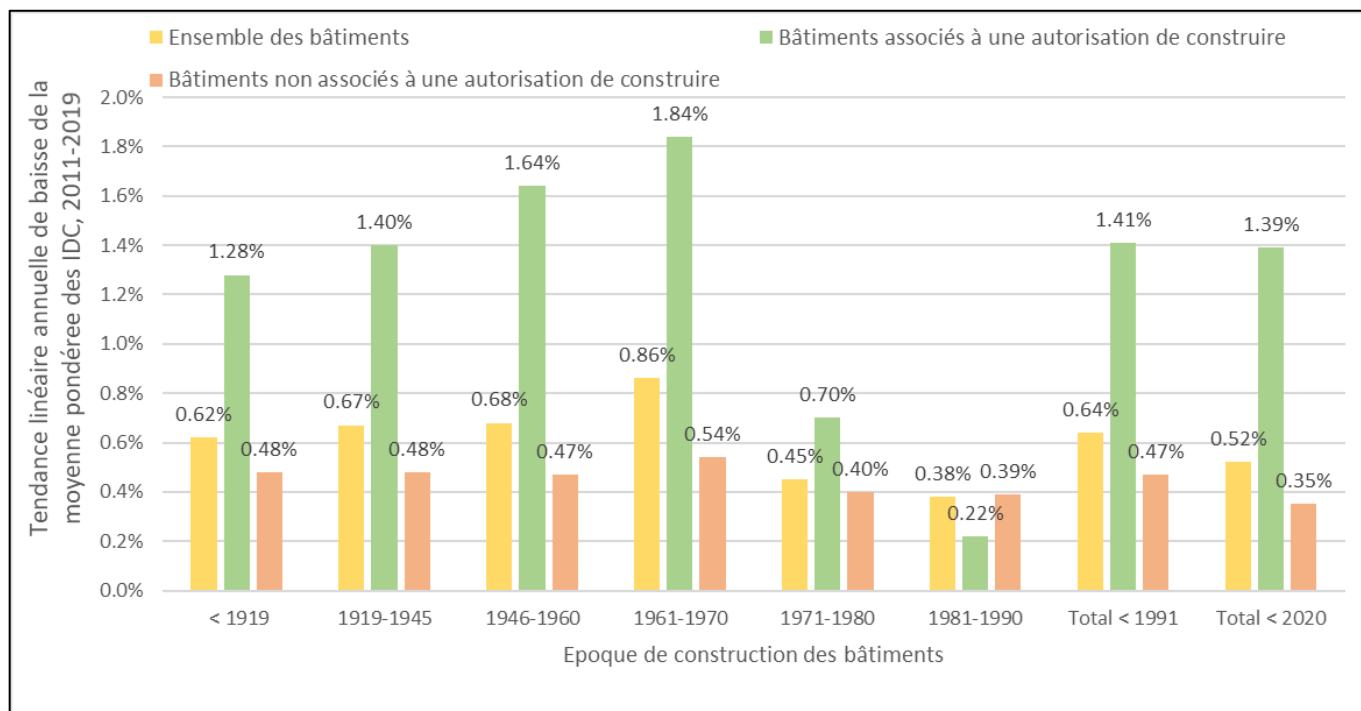


Figure 9 - Evolution de la moyenne pondérée des IDC pour l'ensemble des bâtiments (jaune), les bâtiments rénovés (en vert), et les bâtiments non rénovés (en orange).

De manière générale, la tendance à la baisse de 0.52% par année pour l'ensemble des bâtiments est la conséquence de deux faits distincts :

- La rénovation énergétique de bâtiment associés à une autorisation de construire ;
- Les économies d'énergie réalisées sans autorisation de construire et peu corrélées à l'époque de construction telles que :
 - L'optimisation ou la rénovation technique hors procédure d'autorisation de construire ;
 - Les éventuels changements de comportement des habitants ;
 - Les éventuelles imperfections de la méthode de correction climatique utilisée pour les IDC.

Aussi, il a été expliqué dans la méthodologie que les données qui ont été utilisées dans cette étude rassemblent de manière large les autorisations de construire avec un impact énergétique potentiel. Par conséquent, une partie des autorisations de construire retenues à travers le filtre par mots-clefs ont que peu ou pas d'impact sur la consommation d'énergie. Si bien que les valeurs calculées de tendance linéaire de baisse de consommation des bâtiments associés à une autorisation de construire sont représentatives des travaux de rénovation énergétiques. Toutefois, ces valeurs sont également influencées par le filtrage par mots-clefs. En effet, effectuer un filtrage plus fin pour augmenter la certitude qu'une rénovation énergétique a été faite engendrerait une baisse de l'IDC plus importante (moins de rénovations mais avec plus d'effets). En revanche, ce filtrage plus fin impacterait les résultats pour les bâtiments non rénovés (en orange, cf. Figure 8) que de manière très marginale.

De surcroît, la manière la plus fiable de mesurer l'effet des rénovations énergétiques à l'échelle du parc bâti consiste à comparer les résultats de l'ensemble des bâtiments avec ceux dont on peut exclure la rénovation. La différence entre les deux tendances permettant d'estimer l'effet réel des rénovations. Par ailleurs, les résultats concernant les bâtiments rénovés sont principalement utiles à titre indicatif pour mettre en lumière qu'il existe bien un effet mesurable des rénovations sur la consommation énergétique et de manière relative, pour mettre en évidence la variation de cet effet entre les différentes époques de construction.

Pour les bâtiments construits entre 1981 et 1990, l'étude montre que les baisses moyennes sont presque identiques (0.38% pour l'ensemble du parc et 0.22% pour les bâtiments rénovés). Ces chiffres corroborent l'observation déjà présentée dans le sous-chapitre précédent - à savoir que la tendance à la baisse de la demande en énergie des bâtiments de cette époque s'explique surtout par des baisses comprises entre 50 et 150 MJ/m².an (cf. Figure 4), engendrées probablement par des mesures d'optimisation ou de sensibilisation plutôt qu'à des mesures constructives soumises à autorisation de construire. Dès lors, la rénovation énergétique ne semble donc pas constituer un facteur de baisse de la demande à large échelle pour cette époque de construction.

De même, l'impact de la rénovation énergétique est extrêmement faible pour les bâtiments construits entre 1971 et 1980 : 0.05% par an de différence entre les tendances d'évolution des bâtiments non rénovés (0.4%) et de l'ensemble du parc (0.45%).

Ensuite, les bâtiments construits entre 1961 et 1970 connaissent une baisse tendancielle de 0.86% par année. Sans les bâtiments ayant fait l'objet d'une autorisation de construire à plus-value énergétique, cette baisse est de 0.54%. Ainsi, pour l'ensemble du parc de cette époque, la rénovation énergétique est particulièrement visible à large échelle et explique environ 0.3% de baisse de consommation par an à l'échelle du parc, soit environ 37%² des économies globalement réalisées par l'ensemble des bâtiments de cette époque.

Dans l'ensemble, la rénovation énergétique ne constitue donc pas le principal vecteur de baisse de l'IDC moyen pondéré. En effet, la tendance linéaire à la baisse est de 0.52% pour l'ensemble des bâtiments du parc IDC (construits avant 2020), et de 0.35% pour les bâtiments n'ayant pas fait l'objet d'une autorisation de construire à plus-value énergétique. La différence entre ces deux pourcentages de baisse (0.17%) permet de donner un premier ordre de grandeur de la contribution des rénovations.

Pour conclure, l'effet maximal réel en termes d'économies d'énergie lors des rénovations est obtenu pour les bâtiments construits entre 1961-1970, suivi ensuite dans l'ordre par les bâtiments « 1946-1960 », « 1919-1945 », et « avant 1919 ». En d'autres termes, pour les bâtiments construits avant 1970, plus la période de construction est ancienne moins l'effet de la rénovation énergétique est marqué.

² $(0.86\% - 0.54\%) / 0.86\% = 37\%$

4.2.3 Relation entre les économies d'énergies observées à la suite d'une rénovation énergétique et la consommation avant les travaux

En vue de comprendre un peu mieux la relation entre les autorisations de construire à plus-value énergétique et les économies d'énergies observées, il est possible de présenter les baisses des IDC à la suite d'autorisations de construire en fonction de leur consommation avant les travaux (cf. Figure 10). Cette analyse concerne les 1'442 bâtiments³ avec une autorisation de construire à plus-value énergétique, respectivement les 340 cas les plus fiables.

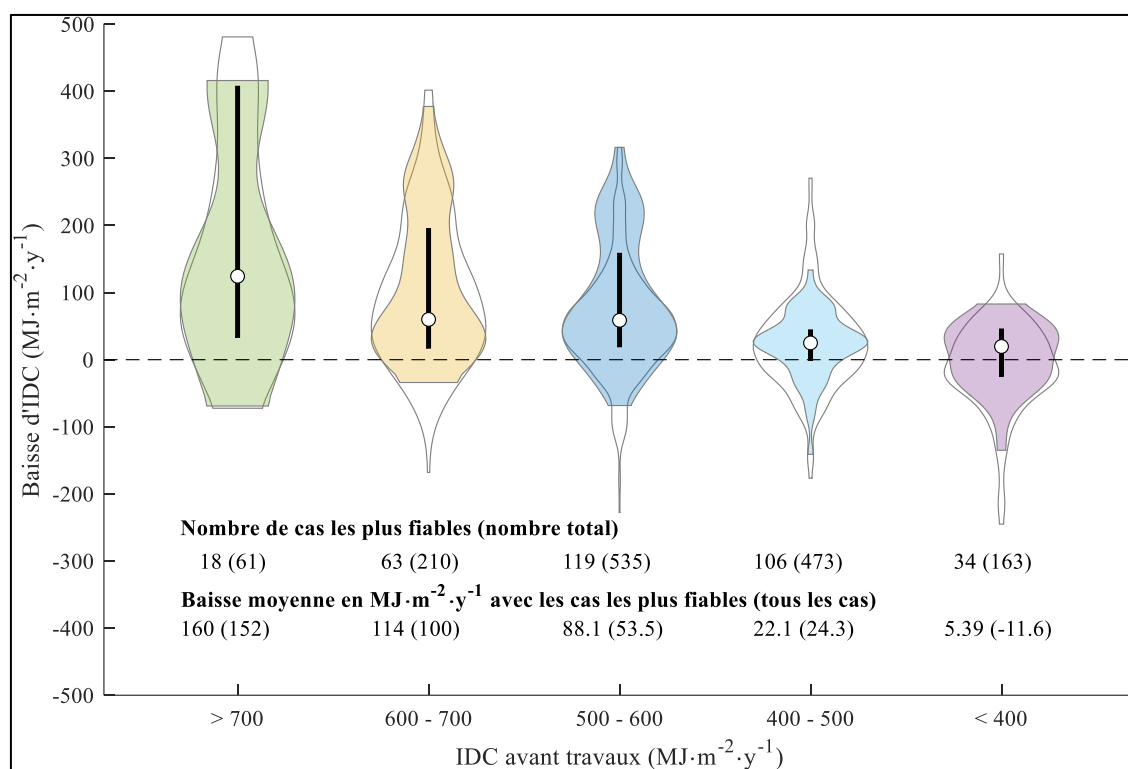


Figure 10 - Distribution des baisses d'IDC par familles d'IDC avant rénovation, avec une comparaison entre les cas les plus fiables (en couleur) et l'ensemble des cas (silhouette en gris). Pour les cas les plus fiables la médiane est indiquée par le cercle blanc, et les 25-75 percentiles par les lignes noires verticales.

Il est possible d'observer que les effets énergétiques des autorisations de construire semblent assez négligeables pour les bâtiments qui possédaient un IDC moyen inférieur à 500 MJ/m².an avant les travaux. A l'inverse, pour les bâtiments dont la consommation était supérieure à 700 MJ/m².an avant les travaux, les économies d'énergies sont plus importantes (baisse moyenne de 160 MJ/m².an). En outre, dans le cas de ces bâtiments peu performants avant les travaux, 22,1% des autorisations de construire sont suivies d'économies d'énergie supérieures à 250 MJ/m².an. Il s'agit donc de projets de rénovation avec une assez grande ambition énergétique.

Pour s'assurer de la corrélation entre la consommation avant les travaux et les économies réalisées, une analyse de variance a été effectuée. Le résultat obtenu pour cette dernière est une valeur P inférieure à 10⁻¹². En d'autres termes, il est possible de confirmer sur le plan statistique qu'il existe un lien significatif entre la consommation avant les travaux et les économies réalisées.

³ Sur le total des 1'444 bâtiments avec rénovation à plus-value énergétique, deux cas ont été éliminés de la Figure 10.

4.2.4 Relation entre les économies d'énergies observées à la suite d'une autorisation de construire à plus-value énergétique et l'époque de construction

Il est également possible d'observer la relation entre les économies d'énergie à la suite d'une autorisation de construire et l'époque de construction⁴ (cf. Figure 11).

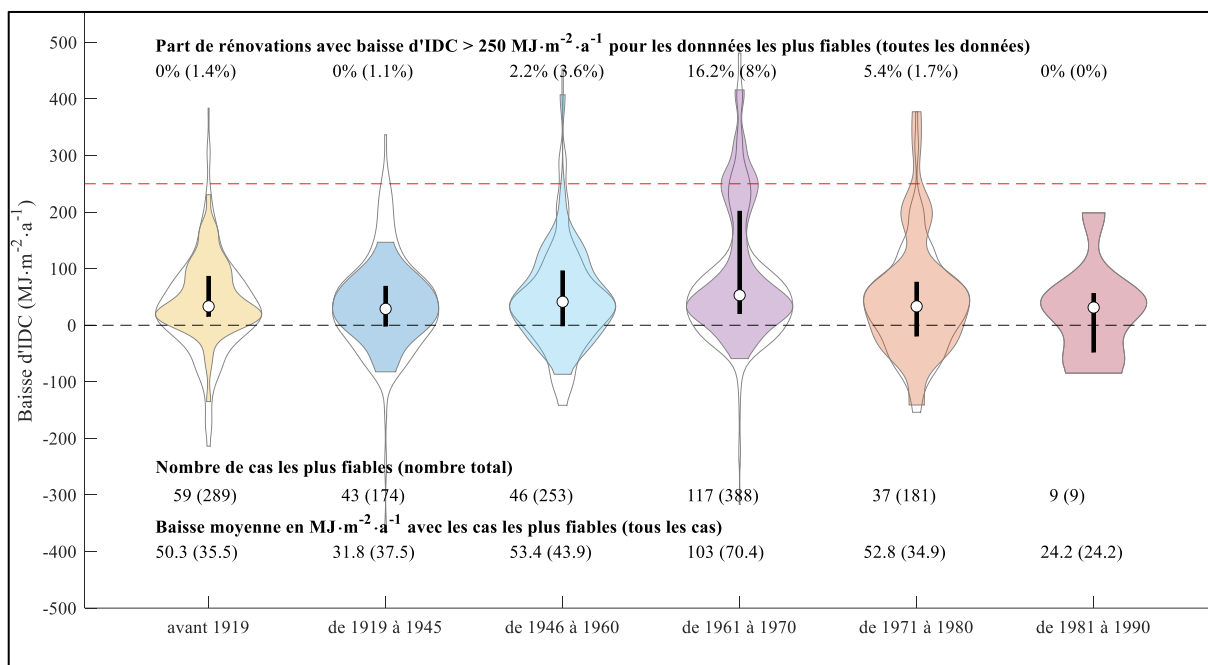


Figure 11 - Distribution des réductions des IDC par époque de construction, avec une comparaison entre les données les plus fiables (en couleur) et la totalité des cas (silhouette en gris). Pour l'ensemble des données les plus fiables, la valeur médiane est indiquée par le cercle blanc, et les 25-75 percentiles par la ligne noire verticale.

Nous pouvons constater que la baisse des IDC à la suite d'une rénovation est en moyenne plus élevée pour les bâtiments construits entre 1961 et 1970. En effet, la réduction moyenne s'établit à 103 MJ/m².an et la part de rénovations avec une baisse supérieure à 250 MJ/m².an est la plus grande (8%). Vraisemblablement, les bâtiments de cette période de construction font plus souvent l'objet de rénovations énergétiques globales que ceux plus récents (encore peu rénovés entièrement) ou que ceux plus anciens (certains déjà rénovés, au moins en partie). Dans une moindre mesure, plus les années vont passer, plus les bâtiments construits entre 1971 et 1980 vont probablement connaître des rénovations importantes et donc aboutir aux mêmes résultats que ceux construits entre 1961 et 1970.

4.2.5 Relation entre les économies d'énergies observées à la suite d'une autorisation de construire à plus-value énergétique et le type d'autorisation de construire

De façon à pousser l'analyse un peu plus loin, il est nécessaire de comprendre si le type d'autorisation de construire possède une influence sur les économies d'énergie observées. Il est donc en premier lieu important de préciser ces procédures d'autorisation de construire. Ainsi, pour effectuer des travaux dans les bâtiments existants, il existe trois les procédures administratives :

⁴ Les bâtiments construits après 1990 ne sont pas représentés car ils ne font pas suffisamment l'objet de rénovations énergétiques pour que le résultat soit significatif.

- Autorisation en procédure accélérée (APA) : pour les rénovations les plus simples qui ne modifient pas ou très peu l'aspect général du bâtiment ;
- Demande définitive (DD) ;
- Hors procédure d'autorisation : pour certains travaux à faible impact qui ne sont pas soumis à autorisation de construire. Les données associées à ce type de procédure n'ont pas été obtenues dans le cadre de cette étude.

La demande en procédure accélérée (APA) s'applique aux travaux suivants :

- Modification intérieure d'un bâtiment existant. Par exemples : les aménagements intérieurs ou rénovations intérieures ;
- Modification d'un bâtiment n'impliquant pas de changement sur son aspect général. Par exemple : rénovation de l'enveloppe ;
- Construction nouvelle de peu d'importance. C'est-à-dire les constructions prévues à l'article 3 du Règlement d'application de la loi sur les constructions et les installations diverses (RCI), les agrandissements mesurés et les installations diverses ;
- Construction nouvelle provisoire. Par exemple : les bâtiments provisoires pour requérants d'asile ;
- A titre exceptionnel, les travaux de reconstruction présentant un caractère d'urgence. Par exemple : reconstruction d'un immeuble détruit par suite d'un incendie.

Il est important de souligner que les exigences énergétiques sont identiques entre l'autorisation en procédure accélérée et la demande définitive, et que l'OCEN traite ces demandes de la même manière. Cependant, compte tenu des cas décrits ci-dessus, il est probable que les rénovations énergiques ambitieuses qui impliquent une modification de l'aspect extérieur du bâtiment fassent l'objet d'une procédure de type « DD ». Cette hypothèse se vérifie grâce aux résultats présentés dans la Figure ci-dessous.

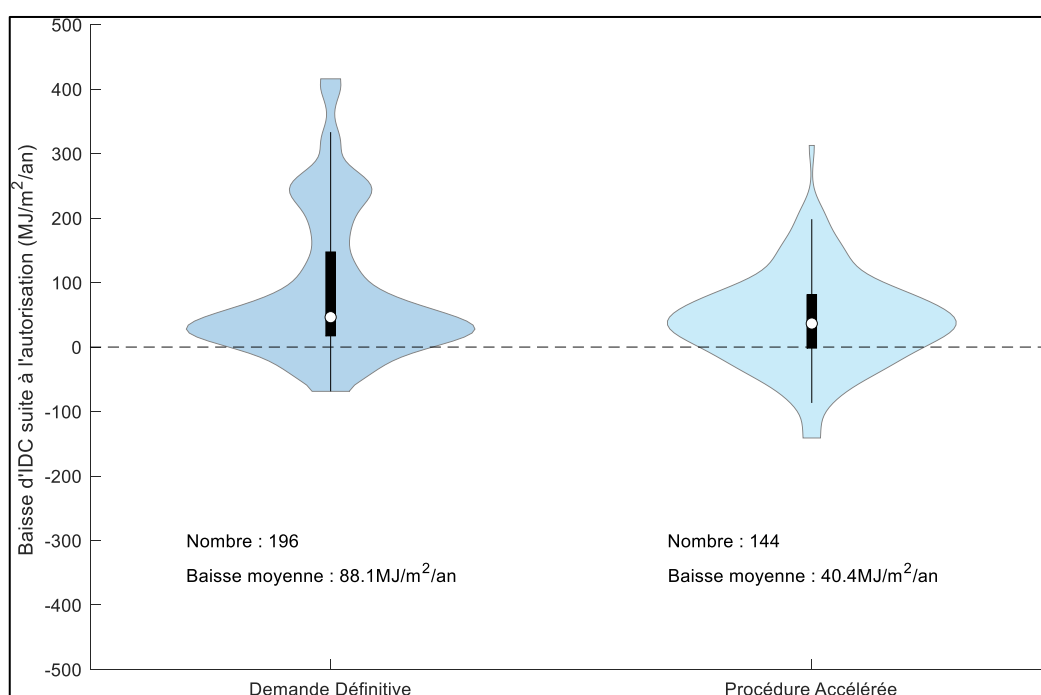


Figure 12 - Comparaison entre les baisses d'IDC à la suite d'une autorisation de construire de type « demande définitive » ou « procédure accélérée » pour les cas les plus fiables

En effet, la baisse moyenne de l'IDC est deux fois plus importante dans le cas d'une procédure de type DD (88.1 MJ/m².an) que pour celle de type APA (40.4 MJ/m².an). De plus, la part d'autorisation de construire à plus-value énergétique donnant lieu à une baisse d'IDC supérieure à 250 MJ/m².an se situe entre 6% (à partir de l'ensemble des cas) et 10% (à partir des données les plus fiables) dans le cas des DD, alors qu'elle est totalement marginale dans le cas des APA (0.6-0.7%).

4.2.6 Relation entre les économies d'énergies observées à la suite d'une rénovation énergétique des bâtiments faisant l'objet d'un contrat d'optimisation énergétique

Depuis 2014, les Services industriels de Genève proposent un programme d'optimisation de chaufferies. Il s'agit d'un contrat d'optimisation énergétique (COE) qui lie les SIG au propriétaire. Le but étant que les SIG soient rémunérés proportionnellement aux économies d'énergie qu'ils font réaliser au propriétaire du bâtiment. Actuellement, c'est plus de 1'200 numéros EGID de la base de données IDC qui sont concernés. Il est donc intéressant de comparer les baisses des IDC de ces bâtiments bénéficiant d'un COE avec le reste des bâtiments liés à une autorisation de construire à plus-value énergétique (cf. Figure 13). Il est à noter que pour effectuer cette comparaison, l'analyse a été faite uniquement sur l'ensemble des données et pas sur le sous-ensemble des données les plus fiables.

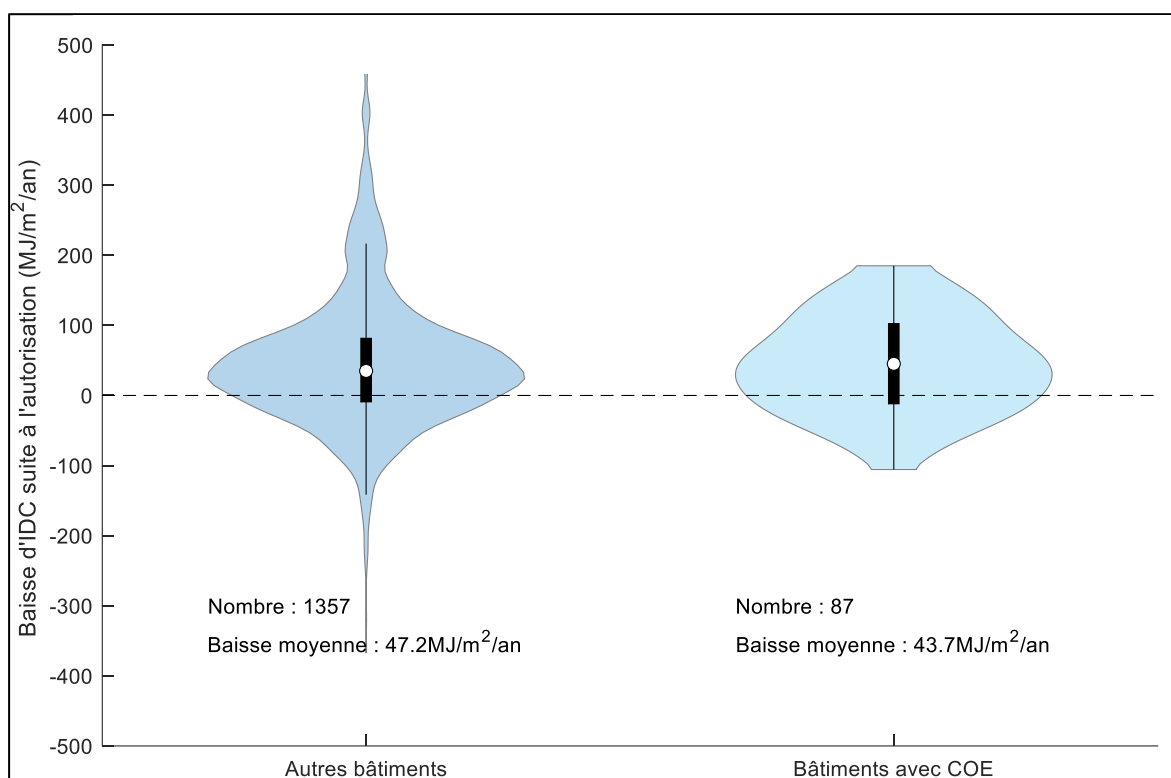


Figure 13 – Baisse de l'IDC pour les bâtiments rénovés énergétiquement, séparés entre ceux faisant l'objet d'un COE et les autres.

A première vue il n'existe pas de différence significative entre ces deux échantillons. Toutefois, il est nécessaire de préciser que cette comparaison est délicate à effectuer sur le plan statistique étant donné les limites suivantes :

- Le nombre de cas issus du croisement entre les deux bases de données n'est que de 87 ;

- Il est possible que les propriétaires des bâtiments bénéficiant d'un COE cherchent avant tout à baisser la consommation sans faire de rénovation globale. Dès lors, les deux échantillons ne sont pas vraiment comparables à la base ;
- Bien que le programme des COE mis en place par les SIG remonte à 2014, la plupart des projets sont récents. Si bien qu'il est possible que les effets de l'optimisation ne coïncident pas temporellement aux travaux de rénovations (par exemple, un bâtiment déjà optimisé avant les travaux réalisera de plus petites économies d'énergie) ;
- L'algorithme utilisée pour cette étude recherche une consommation avant et après travaux, ce qui ne correspond pas forcément aux effets et périodes du COE.

4.2.7 Relation entre les économies d'énergies observées à la suite d'une autorisation de construire à plus-value énergétique des bâtiments appartenant à la caisse de pension de l'Etat de Genève (CPEG)

La caisse de pension de l'Etat de Genève possède plus de 10'000 logements et sa politique de rénovation énergétique est particulièrement ambitieuse. En effet, le taux de rénovation de son parc immobilier avoisine 3.5% par année. Par ailleurs, la CPEG effectue un suivi régulier de l'indice de dépense de chaleur pour chacun de ces bâtiments afin de détecter d'éventuelles dérives et dysfonctionnements. Malheureusement, seules 35 autorisations de construire associées à une variation de l'IDC correspondent aux bâtiments appartenant à la CPEG (cf. Figure 14).

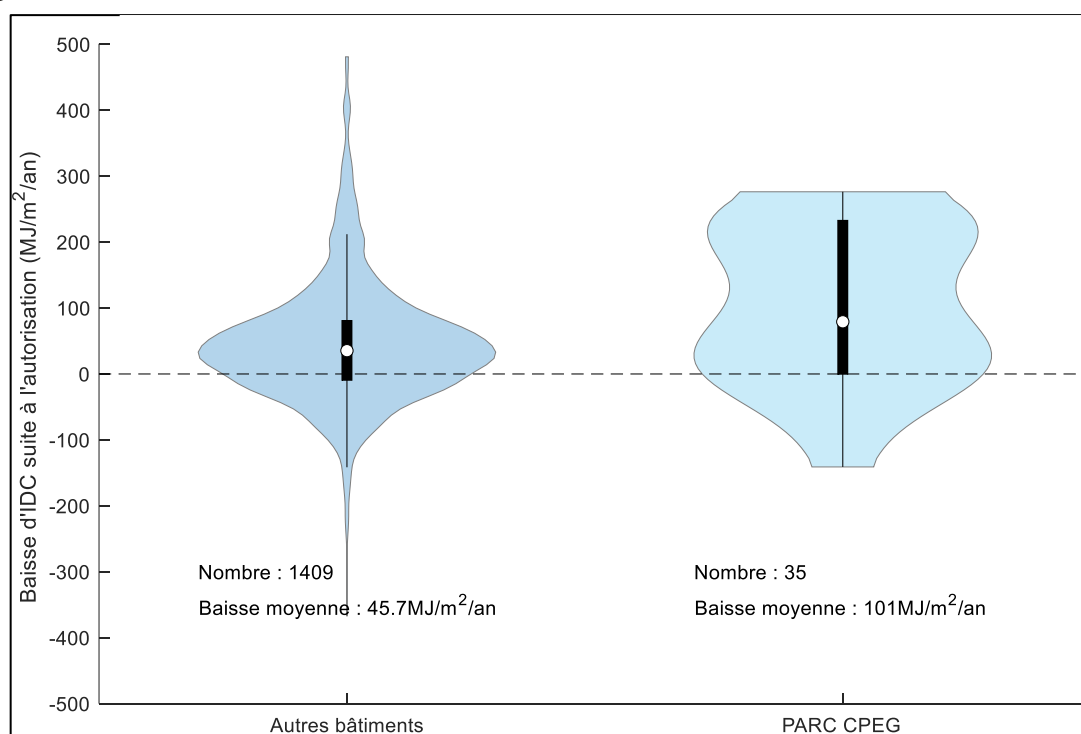


Figure 14 - Comparaison entre les bâtiments de la CPEG et les autres bâtiments liés à une autorisation de construire

Toutefois, malgré le peu de cas, il est possible de constater que sur ces 35 cas, la baisse moyenne (101 MJ/m².an) est deux fois plus importante que pour le reste des bâtiments (45.7 MJ/m².an). Cette différence met en évidence l'importance d'un suivi énergétique pour améliorer l'impact des rénovations. Il est tout de même à noter qu'au vue de la faible taille de l'échantillon, l'analyse a été faite seulement sur l'ensemble des données et pas sur le sous-ensemble des données les plus fiables.

4.2.8 Relation entre les économies d'énergies observées à la suite d'une autorisation de construire à plus-value énergétique des bâtiments de l'étude « COMPARE RENOVE »

Les consommations prévues après les travaux ne sont pas connues dans le cadre de cette étude. Effectivement, ces données sont uniquement disponibles dans les dossiers d'autorisation de construire ; il serait donc nécessaire de consulter les dossiers individuellement pour obtenir ces données. Cependant, il semble intéressant de comparer les résultats de la présente étude avec l'échantillon de l'étude « COMPARE RENOVE » [3].

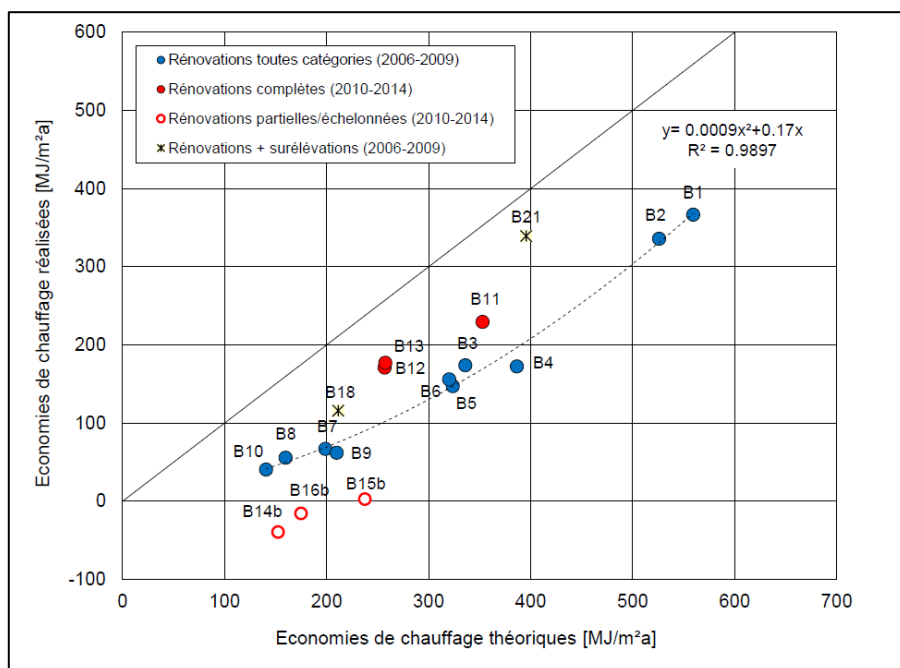


Figure 15 – Echantillon de l'étude « COMPARE RENOVE » : représentation des économies de chauffage réalisées par rapport aux économies théoriques

Ce parallèle peut permettre de comparer les économies réalisées avec celles théoriques. Dans ce but, et sans disposer d'informations complémentaires, l'économie visée est estimée à partir d'un objectif de consommation hypothétique pour l'enveloppe (150% la valeur limite de la SIA 380/1). Cet objectif paraît très probablement trop ambitieux dans le cas précis de notre étude. En effet, l'ensemble des autorisations de construire qui ont été traitées présentement étant constitué de rénovations globales mais également partielles. En d'autres termes, cet objectif hypothétique serait correct si chaque bâtiment associé à une autorisation de construire à plus-value énergétique visait ensuite une consommation qui respecterait la valeur limite de la SIA. En revanche, la relation entre l'échantillon « COMPARE RENOVE » et les résultats estimés permet de mieux appréhender la différence entre ces deux échantillons (cf. Figure 16), ainsi que de donner une estimation de l'ambition moyenne des autorisations de construire.

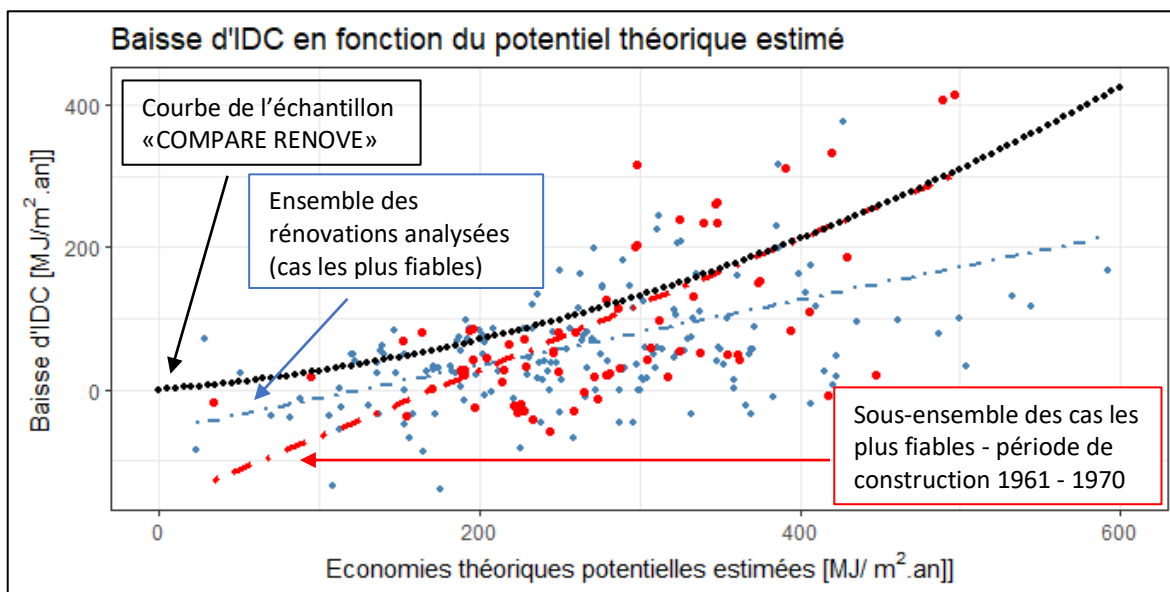


Figure 16 - Comparaison entre la courbe de « COMPARE RENOVE » et les baisses d'IDC à la suite des autorisations de construire à plus-value énergétique pour les 340 cas les plus fiables (ensemble des cas les plus fiables en bleu, et seulement pour la période de construction 1961 – 1970 en rouge). Les économies théoriques sont exprimées en termes d'économies potentielles si la valeur limite SIA était visée.

Les résultats de l'échantillon « COMPARE RENOVE » (cf. Figure 16, courbe noire) sont supérieurs en termes de baisse d'IDC réelle en comparaison à l'ensemble des autorisations de construire (droite bleue). Cette différence provient vraisemblablement dû fait que l'ambition énergétique moyenne des autorisations de construire est plus faible que celle des rénovations analysées dans l'étude « COMPARE RENOVE ». La droite bleue obtenue à partir de l'ensemble des bâtiments associés à une autorisation de construire à plus-value énergétique représente environ la moitié que celle de « COMPARE RENOVE ». En outre, la tendance de la courbe noire indique que la part des économies effectivement réalisées est plus importante lorsque les économies théoriques sont grandes. Or, cette tendance ne se retrouve pas de manière significative dans l'échantillon de l'ensemble des autorisations de construire. En effet, pour cet ensemble, la relation entre une économie potentielle et la baisse de l'IDC constatée serait plutôt linéaire, mais avec une dispersion importante. En considérant uniquement les bâtiments construits entre 1961 et 1970 liés à une autorisation de construire à plus-value énergétique (période de construction correspondante à la majorité des bâtiments de « COMPARE RENOVE »), on constate que plus les économies théoriques potentielles estimées sont importantes, plus la droite (en rouge) se rapproche de la courbe de « COMPARE RENOVE ». Toutefois, il est nécessaire de prendre ces résultats avec prudence étant donné la dispersion importante.

Il est vrai que pour effectuer une comparaison plus significative entre ces différents échantillons il serait nécessaire de mieux filtrer les autorisations de construire de façon à obtenir uniquement les bâtiments ayant subi une rénovation totale. Toutefois, il est difficile d'effectuer un filtrage plus fin par mots-clefs car les intitulés des demandes d'autorisation ne sont pas assez précis et qu'il n'existe pas de règle générale pour l'intitulé des travaux.

5. Taux de rénovation des bâtiments résidentiels collectifs et mixtes

5.1 Méthodologie

A partir des demandes d'autorisation de construire à plus-value énergétique il a été possible d'établir une méthodologie pour estimer le taux de rénovation, ainsi que le taux de rénovation efficace. Ainsi, les équations suivantes (2) permettent d'évaluer le taux de rénovation :

$$r = \frac{N}{N_{tot}}; r_A = \frac{A}{A_{tot}} \quad (2)$$

Soit :

- N correspond au nombre total d'autorisations de construire, et A à la surface chauffée correspondante ;
- Le taux de rénovation r par rapport à un nombre total de bâtiments (N_{tot} : avec l'hypothèse que chaque numéro EGID correspond à un bâtiment) ;
- r_A par rapport à la surface totale chauffée A_{tot} .

En fait, les taux de rénovations r et r_A sont des valeurs très générales car ils incluent toutes les autorisations de construire en lien avec l'énergie et ce, quelles que soient leurs ambitions énergétiques. Ces taux de rénovation relatif au nombre de bâtiment ou par surface sont différenciés afin de permettre de déterminer si proportionnellement il existe une différence de rénovation entre les petits et les grands bâtiments. Il est également important de souligner que le taux de rénovation par surface estimé dans l'équation (2) est à considérer de manière prudente car en effet, la totalité de la surface d'un très grand bâtiment qui a fait l'objet d'une petite intervention ponctuelle sera comptabilisé alors que l'impact énergétique sera potentiellement limité à une petite partie du bâtiment. Dès lors, les taux de rénovations r et r_A facilitent l'appréhension de la dynamique des autorisations de construire en lien avec l'énergie, mais ne permettent pas d'estimer l'effet réel de ces rénovations en termes d'économies d'énergies réalisées (tant économies attendues que économies réelles).

En outre, comme il a été exprimé dans le chapitre précédent, la présente étude ne considère pas les objectifs théoriques de consommation après les travaux car cela nécessiterait une recherche manuelle dans chaque formulaire archivé par l'Office des autorisations de construire (OAC). L'approche est donc complémentaire à celle de type « écart à la performance » et vise à estimer le taux de rénovation énergétiquement efficace r_i du parc bâti. Pour ce faire, l'étude se base sur la variation des IDC des bâtiments, c'est-à-dire sur la consommation d'énergie finale réellement mesurée.

De façon à faciliter la compréhension et la lecture des résultats, des classes de consommation énergétique ont été extrapolées à partir des valeurs d'IDC avant et après les travaux pour chaque bâtiment. Ces classes énergétiques reprennent l'idée de la norme SIA 2031 et correspondent à des rapports entre la consommation mesurée et la valeur normative admissible en énergie finale. Effectivement, comparer uniquement des économies d'énergie en valeur absolue présente le défaut que, par exemple, une réduction de consommation en

énergie finale de 300 MJ/m².an ne représente clairement pas la même ambition pour un bâtiment dont la consommation est de 2'000 MJ/m².an ou 500 MJ/m².an.

A l'inverse, une analyse basée uniquement sur des résultats relatifs à la consommation avant les travaux (par exemple 20% d'économies) peut rendre plus difficile une interprétation en termes d'économies réelles. Par conséquent, l'approche en termes de classes énergétiques mesurées semble être une démarche intéressante. Il est ainsi possible de qualifier cette approche d'intermédiaire entre des résultats relatifs et absolus car la classe énergétique représente une comparaison entre la consommation réelle⁵ et la consommation idéale d'un bâtiment neuf avec une utilisation standard. Cette comparaison est calculée sous forme de rapports :

$$R_{before} = \frac{\overline{IDC}_{before}}{E_{h,li} + E_{ww}}; R_{after} = \frac{\overline{IDC}_{after}}{E_{h,li} + E_{ww}} \quad (3)$$

Avec :

- $\overline{IDC}_{before/after}$ représente la moyenne des IDC avant et après les travaux ;
- $E_{h,li}$ correspond à l'énergie finale admissible pour le chauffage de nouveaux bâtiments, estimée avec $E_{h,li} = Q_{H,li} \cdot \eta_p^{-1}$. La chaleur utile $Q_{h,li}$ est calculée selon la norme SIA 380/1 [8], avec l'hypothèse d'un facteur de forme $A_{th}/A_e = 1$, ainsi qu'un facteur de correction climatique pour Genève de $f_{cor} = 0.922$. Le rendement de la production de chaleur η_p est repris selon la directive pour le calcul de l'IDC, et la consommation d'énergie finale pour l'ECS (E_{ww}) est reprise du cahier technique SIA 2031 [7].

Ensuite, les rapports R_{before} et R_{after} sont utilisés pour convertir les valeurs des IDC avant ou après les travaux dans des classes énergétiques allant de « A » à « G », en s'inspirant du tableau 3 du cahier technique SIA 2031 [7] (cf. Annexe G). Chaque classe correspond à un incrément fixe de R de 50%, avec une classe maximale fixée à « G » pour les bâtiments dont le R est supérieur à 300%⁶.

Ainsi, pour chaque autorisation de construire à plus-value énergétique, une classe énergétique avant et après les travaux a été estimée sur la base de la consommation mesurée du bâtiment et moyennée sur trois ans. Puis, un changement de classe énergétique ΔC_{IDC} a été déduit. Par exemple, un bâtiment rénové pour lequel la classe énergétique déduite de l'IDC s'améliore de « G » à « E » correspondra à un changement positif de deux classes ($\Delta C_{IDC} = 2$). Il est à noter que la représentation des résultats sous forme de classes peut présenter des effets de seuil car certaines rénovations étant à la limite (par exemple entre des sauts de un ou deux classes). Cependant, comme l'objectif étant d'obtenir une vision statistique globale des impacts des rénovations sur les consommations, ces effets de seuil ne

⁵ Cette consommation est uniquement théorique dans le cas des étiquettes CECB enveloppe ou énergie. Les classes déduites à partir des IDC ne correspondent donc pas aux classes CECB, et représentent surtout un moyen de représenter les résultats en termes d'efficacité des rénovations.

⁶ Cette méthode se base ainsi sur l'idée du cahier technique SIA 2031, en adaptant toutefois la méthode aux données à disposition. En d'autres termes, les hypothèses de notre approche (facteur de forme fixe, rendement fixe), ainsi que la méthode de calcul de l'IDC peuvent potentiellement induire un écart de classe avec un calcul qui serait effectué sur la base de la méthode SIA 2031 mesurée.

devraient avoir qu'une incidence réduite sur les résultats présentés. En effet, il est vraisemblable que l'impact de ces effets de seuil soit statistiquement lissé en considérant les résultats sur un grand nombre de bâtiments.

Puis, après avoir associé les sauts de classe(s) IDC à chaque autorisation de construire à plus-value énergétique, un taux de rénovation énergétiquement efficace r_i a été défini (équation 4). Ce dernier représente la proportion des bâtiments ayant effectué un saut de i classe(s) énergétique(s) par rapport au nombre total de bâtiments :

$$r_i = \frac{\text{Count}(\Delta C_{IDC} = i)}{N_{tot}} \quad (4)$$

$\text{Count}(\Delta C_{IDC} = i)$ étant le nombre total d'autorisations de construire associées à un changement de i classe(s). Par la suite, il sera également utilisé la notation de r_{i+} , pour désigner le taux de rénovation annuel qui amène une amélioration d'au moins i classe(s).

5.2 Résultats

Pour l'ensemble des bâtiments résidentiels collectifs et mixtes qui ont été associés à une demande d'autorisation de construire à plus-value énergétique, les taux de rénovation et taux de rénovation énergétique efficace ont été calculés. Le tableau suivant présente les résultats :

Tableau 5 - Taux annuel moyen de rénovation 2010-2018

Période de construction	Taux de rénovation		Fraction par gain de classe : r_i/r (%)						Taux de rénovation efficace	
	r	r_A	> 2	2	1	0	-1	≤ -2	r_{2+}	r_{1+}
Avant 1919	1.7%	1.8%	0.6%	5.3%	26.2%	58.2%	8.8%	0.9%	0.1%	0.5%
1919-1945	2.0%	2.0%	0.0%	4.6%	23.2%	62.4%	9.3%	0.5%	0.1%	0.6%
1946-1960	1.7%	2.0%	5.4%	3.5%	27.3%	56.5%	7.3%	0.0%	0.2%	0.6%
1961-1970	2.4%	2.6%	8.1%	8.1%	29.1%	50.1%	4.2%	0.2%	0.4%	1.1%
1971-1980	1.3%	1.5%	3.3%	3.3%	31.3%	48.9%	12.6%	0.5%	0.1%	0.5%
1981-1990	0.4%	0.6%	0.0%	2.5%	37.5%	37.5%	22.5%	0.0%	0.0%	0.2%
Total	1.7%	1.9%	3.9%	5.3%	27.8%	54.4%	8.2%	0.4%	0.2%	0.6%

Pour chaque période de construction, le taux de rénovation se rapporte au parc immobilier correspondant de la base de données IDC complète entre 2011 et 2019. La période de sélection des autorisations de construire est de 2010 à 2018 car l'impact énergétique des autorisations de construire datant de 2019 ne pourra pas encore être détecté dans les IDC. Les autorisations datant d'avant 2010, c'est-à-dire avant la nouvelle loi sur l'énergie, sont également écartées car elles pourraient influencer les résultats et ne sont pas prises en compte dans cette étude.

Il est également possible d'illustrer ces résultats sous forme de graphique (cf. Figure 17).

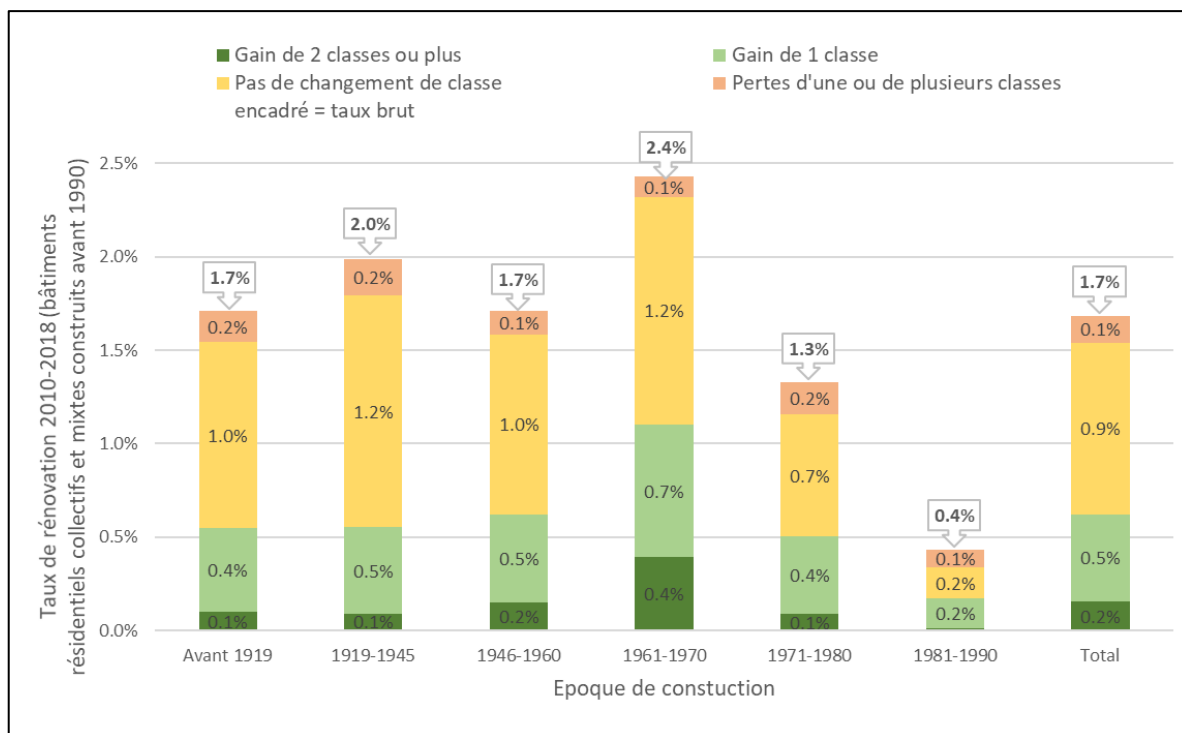


Figure 17 - Visualisation des taux de rénovations globaux par époques de construction et en fonction de leur impact sur les IDC

Sur l'ensemble de l'échantillon (1'444), le taux de rénovation global est estimé à 1.7%. Ce dernier regroupe toutes les autorisations de construire pour lesquelles un impact énergétique est attendu : autant les petites interventions ponctuelles soumises à autorisation que les rénovations globales. Ce taux de rénovation confirme le résultat obtenu dans la thèse de Jad Khoury [2] pour les années 2011 et 2012, et qui avait été obtenu sur la base d'une méthodologie similaire, mais effectuée à la main sur un échantillon plus restreint. Le recoupement des valeurs obtenues sur la base de méthodes de sélection différentes (échantillonnage manuel ou classement automatique par mots-clefs) permet de supposer que la méthode utilisée dans la présente étude fournit une estimation du taux de rénovation satisfaisante.

On peut constater que les taux de rénovation par numéro EGID ($r = 1.7\%$) et par SRE ($r_A = 1.9\%$) sont assez similaires. Toutefois, le taux de rénovation par SRE est légèrement supérieur à celui par EGID ($r_A > r$) ce qui pourrait indiquer que les grands bâtiments font un peu plus souvent l'objet d'autorisations de construire. Il ne faut cependant pas oublier que ces rénovations peuvent potentiellement concerner qu'une petite partie de leurs surfaces chauffées.

Au niveau de l'impact des rénovations sur la consommation d'énergie les constatations suivantes peuvent être énumérées :

- La majorité (54%) des rénovations se traduisent dans les faits par un changement de consommation qui n'est pas suffisamment significatif pour changer de classe énergétique. Autrement dit, un peu plus d'un bâtiment associé à une autorisation de construire à plus-value énergétique sur deux verra sa consommation légèrement diminuer ou augmenter ;
- 28% des rénovations sont suivies d'une amélioration d'une classe ;

- Les 18% restants sont partagés entre des bâtiments qui ont vu leurs classes énergétiques gagner au moins deux classes (par exemple de « G » à « E ») et ceux dont l'augmentation de la consommation a engendré la perte d'une classe (par exemple de « E » à « F »). En d'autres termes, le taux de rénovation énergétique efficace r_{i+} (rénovation avec le gain d'au moins une classe) s'élève à $r_{1+} = 1.7\% \cdot (3.9\% + 5.3\% + 27.8\%) = 0.6\%$, et $r_{2+} = 1.7\% \cdot (3.9\% + 5.3\%) = 0.2\%$.

De surcroît, les bâtiments construits avant 1971 sont plus rénovés que les bâtiments plus récents. D'ailleurs, le taux de rénovation le plus élevé correspond aux bâtiments construits entre 1961 et 1970 ($r = 2.4\%$), ceux qui constituent la plus grande part de la demande thermique (19.7%). C'est également pour cette époque de construction que les taux de rénovations efficaces sont les plus élevés ($r_{1+} = 1.1\%$, $r_{2+} = 0.4\%$). En effet, ils sont deux fois supérieurs à ceux des autres époques de construction. A l'inverse, les bâtiments construits après 1981 possèdent des taux particulièrement bas ($r = 0.4\%$, $r_{1+} = 0.2\%$, $r_{2+} = 0\%$).

Une analyse de sensibilité sur les taux de rénovation a également été effectuée. Il s'agit en fait de reproduire la même méthode mais en utilisant uniquement les données les plus fiables (340 cas sur 1'444). Ainsi, pour estimer l'impact potentiel sur le taux de rénovation efficace engendrée par la qualité des données, il a été supposé que la répartition de saut de classe par autorisation de construire à plus-value énergétique est donnée par le sous-ensemble des données les plus fiables et réparti ensuite en proportion du taux global des autorisation de construire à plus-value énergétique:

$$\tilde{r}_i = \frac{N}{N_{tot}} \cdot \frac{Count(\Delta C_{IDC} = i)_{most\ reliable}}{N_{most\ reliable}} = r \cdot \frac{Count(\Delta C_{IDC} = i)_{most\ reliable}}{N_{most\ reliable}} \quad (5)$$

Avec cette nouvelle formule les résultats sont présentés dans la Figure ci-dessous.

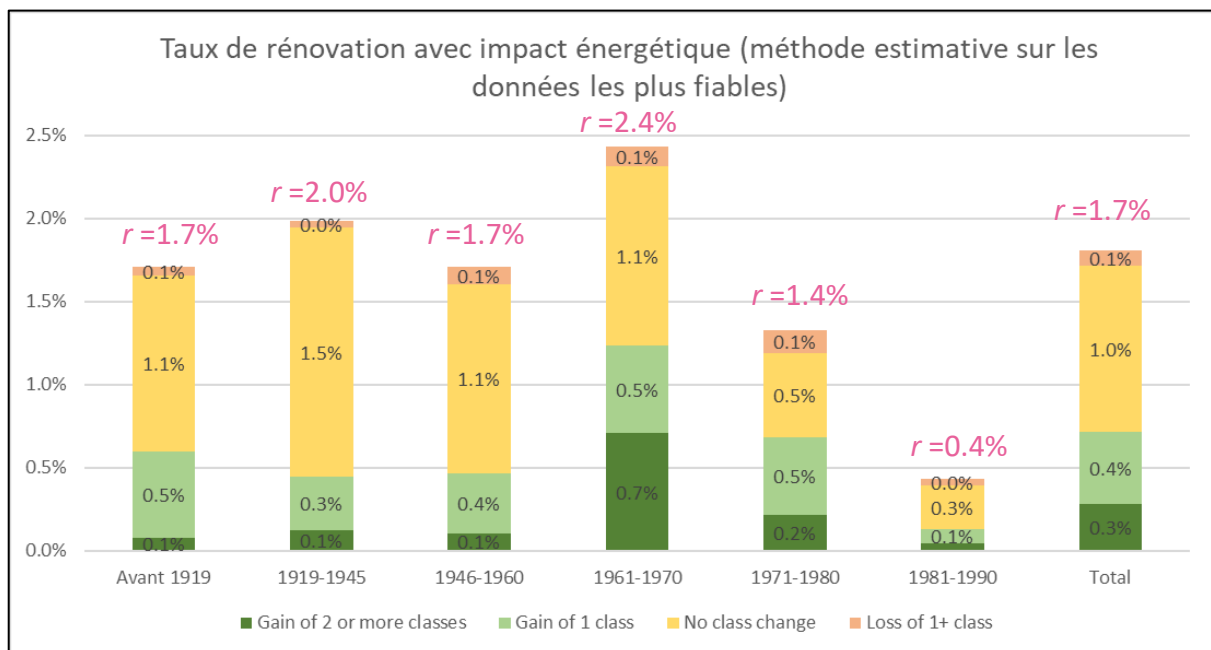


Figure 18 - Visualisation des taux de rénovations globaux par époques de construction et en fonction de leur impact sur les IDC (échantillon des cas les plus fiables)

Dans l'ensemble, la relation (5) donne une estimation légèrement supérieure (+ 0.1%) pour le taux de rénovation efficace, avec $\widetilde{r}_{2+} = 0.3\%$ contre 0.2%, et $\widetilde{r}_{1+} = 0.7\%$ contre 0.6%. Toutefois, une différence plus significative est constatée pour les bâtiments construits entre 1961 et 1970 où le taux $\widetilde{r}_{2+} = 0.7\%$ est plus important que $r_{2+} = 0.4\%$ (cf. Tableau 6). Cet effet est aussi constaté dans une moindre mesure sur les bâtiments construits entre 1971 et 1980.

Tableau 6 – Valeurs numériques des taux de rénovation énergétiquement efficace par époque de construction

	r_{2+}	\widetilde{r}_{2+}	r_1	\widetilde{r}_1	r_{1+}	\widetilde{r}_{1+}
Avant 1919	0.1%	0.1%	0.4%	0.6%	0.5%	0.7%
1919-1945	0.1%	0.1%	0.5%	0.4%	0.6%	0.5%
1946-1960	0.2%	0.1%	0.5%	0.4%	0.6%	0.5%
1961-1970	0.4%	0.7%	0.7%	0.6%	1.1%	1.3%
1971-1980	0.1%	0.2%	0.4%	0.5%	0.5%	0.7%
1981-1990	0.0%	0.0%	0.2%	0.1%	0.2%	0.1%
Total < 1991	0.2%	0.3%	0.5%	0.4%	0.6%	0.7%

En résumé, la relation (5) fournit une valeur légèrement plus optimiste que celle obtenue à partir de la totalité des données. Cela permet également de se rendre compte de la sensibilité de cette approche (une incertitude de $\pm 0.1\%$).

6. Conclusion

Dans un premier temps, ce travail a présenté les résultats de l'analyse de la base de données IDC effectuée sans se référer aux données des autorisations de construire. Il en résulte les éléments principaux suivants :

- La consommation d'énergie thermique des bâtiments résidentiels collectifs et mixtes construits avant 1990 connaît une tendance baissière de 0.64% par année. Cette baisse est la plus marquée pour l'époque de construction allant de 1961 à 1970 (0.86%/an), et la moins marquée pour la période allant de 1981 à 1990 (0.39%/an) ;
- Les tendances à la baisse ne signifient évidemment pas que chaque bâtiment suit la tendance. Certains bâtiments diminuent fortement leurs consommations et poussent ainsi la moyenne globale vers le bas, tandis que les consommations d'autres bâtiments restent stables, voir augmentent ;
- La contribution des baisses importantes de l'IDC (plus de 250 MJ/m².an) dans l'amélioration globale de la performance du parc bâti est particulièrement visible pour les bâtiments construits entre 1961 et 1970 et presque inexistante pour les bâtiments construits entre 1981 et 1990 ;
- La contribution des baisses de consommation entre 50 et 150 MJ/m².an semble assez peu dépendre de la période de construction.

Par ailleurs, en effectuant une séparation dans la base de données IDC entre les bâtiments rénovés et non rénovés, il a été constaté que les bâtiments construits avant 1990 qui n'ont pas fait l'objet d'autorisation de construire à plus-value énergétique présentent une tendance moyenne à la baisse de l'ordre de $0.5\% \pm 0.1\%$ par année. Ce résultat met en évidence les effets de mesures d'économies d'énergie non constructives (optimisations, sensibilisation, etc.) et qui paraissent très peu liées à l'époque de construction.

En outre, la rénovation énergétique ne semble actuellement pas constituer le principal vecteur d'amélioration de l'efficacité énergétique du parc bâti. En effet, la plus grande partie de l'évolution tendancielle à la baisse pour l'ensemble du parc avant 1990 (-0.64%) étant reproduite avec un échantillon qui exclut les bâtiments rénovés (-0.47%). Toutefois, cette baisse de consommation constatée sur les bâtiments non-associés à une autorisation de construire à plus-value énergétique devrait faire l'objet d'études complémentaires afin de quantifier d'autres facteurs tels que : l'optimisation technique ; le comportement des utilisateurs ; les potentielles imperfections dans le calcul de la correction climatique ou encore ; la saisie des données dans la base de données IDC.

Dans le but d'analyser l'effet statistique des autorisations de construire sur la consommation des bâtiments, une séparation a été effectuée entre les résultats les plus fiables (340 cas) et les reste des données (1'444) pour lesquels nous avons des doutes (par exemple certaines données manquantes). L'étude a mis en évidence une baisse moyenne de consommation de 67.9 MJ/m².an à la suite d'une autorisation de construire à plus-value énergétique pour l'ensemble des données les plus fiables. Cette baisse est un peu plus faible (47.0 MJ/m².an) en considérant l'ensemble des résultats. De plus, plus la consommation d'un bâtiment est élevée avant les travaux, plus l'effet moyen d'une autorisation de construire sur la consommation d'énergie est marqué. Pour les bâtiments dont la consommation est inférieure à 500 MJ/m².an avant les travaux, l'effet énergétique des rénovations est en moyenne presque insignifiant.

De même, les résultats ont permis de mettre en évidence que l'effet énergétique des autorisations de construire est en moyenne plus marqué pour les bâtiments construits entre 1961 et 1970, et que la proportion d'autorisations de construire qui donne lieu à des baisses de plus de 250 MJ/m².an (8 à 16.2%) est également plus importante que pour les autres époques de construction. Sur l'ensemble des données, ces baisses de consommation significatives (>250 MJ/m².an) sont très peu nombreuses (3.5%). A l'inverse, il a été constaté que 22% des autorisations de construire avec impact énergétique sont suivies d'une augmentation de la consommation du bâtiment.

L'étude a également permis d'estimer à la fois un taux de rénovation brut qui correspond au rapport entre le nombre d'autorisations de construire et le nombre de bâtiments, ainsi qu'un taux de rénovation efficace qui prend en compte l'effet de ces rénovations sur la consommation d'énergie. Ainsi, le taux de rénovation brut s'est établi à 1.7% par an, le taux de rénovation énergétiquement efficace à 0.6% par an pour une amélioration d'au moins une classe énergétique et à 0.2% par an pour une amélioration d'au moins deux classes. Ces taux de rénovations varient en fonction des différentes époques de construction. En effet, les bâtiments construits entre 1961 et 1970 possèdent un taux de rénovation énergétiquement efficace deux fois supérieur aux autres époques de construction (1.1% pour une amélioration d'au moins une classe énergétique et 0.5% pour une amélioration d'au moins deux classes).

Pour conclure, les résultats de l'étude mettent en évidence que la qualité moyenne et la quantité des rénovations sont aujourd'hui insuffisantes pour atteindre l'objectif de -60% de CO₂ d'ici 2030. Effectivement, pour atteindre cet objectif il serait nécessaire de réduire la consommation d'énergie fossile des bâtiments de 3.5% par an au lieu des 0.64% constatées sur la période 2010-2019 dans la base de données IDC pour les bâtiments résidentiels et mixtes construits avant 1990.

7. Références

- [1] République et canton de Genève - Publications (2020) – <https://www.ge.ch/document/plan-directeur-energie-2020-2030/>.
- [2] KHOURY Jad (2014), *Rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs: état des lieux, retours d'expérience et potentiels du parc genevois*. Thèse. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:48085>
- [3] KHOURY Jad & al. (2018), *COMPARE RENOVE : du catalogue de solutions à la performance réelle des rénovations énergétiques (écarts de performance, bonnes pratiques et enseignements tirés*.
- [4] COZZA Stefano & al. (2019), *GAPxPLORE: Energy Performance Gap in existing, new, and renovated buildings: Learning from large-scale datasets*. Thèse. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:129181>
- [5] MAJCEN Daša & al. (2016), *Actual heating energy savings in thermally renovated Dutch dwellings*. Energy Policy. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.07.015>
- [6] Office cantonal de l'énergie (OCEN), *Directive relative au calcul de l'indice de dépense de chaleur*. Novembre 2021.
- [7] Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), *SIA 2031 - Certificats énergétique des bâtiments*. SNR 592031:2016
- [8] Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), *SIA 380/1 – Besoins de chaleur pour le chauffage*. SNR 520380/1-C1

ANNEXES

Annexe A – Éléments complémentaires concernant les données du cadastre, les IDC et la consommation de combustibles fossiles

Annexe B – Éléments complémentaires concernant les mots-clefs pour le filtrage sur les demandes d'autorisation de construire

Annexe C – Illustration du procédé de géomatique pour le croisement entre les données des demandes d'autorisation de construire et les bâtiments

Annexe D – Distribution de la variation des IDC entre 2011 et 2019 pour les différentes époques de construction

Annexe E – Visualisation d'exemples des résultats individuels du fonctionnement de l'algorithme

Annexe F – Comparaison du taux de rénovation efficace en fonction de l'échantillonnage

Annexe G – Extraction du cahier technique SIA 2031 pour les classes énergétiques

Annexe A – Eléments complémentaires concernant les données du cadastre, les IDC et la consommation de combustibles fossiles

Changements de méthodes des données IDC

Un changement de la méthode de calcul de l'IDC effectué en 2010 rend difficile une comparaison directe des données avant ou après cette date. Afin d'estimer une évolution des indices avant 2010 il a été effectué une normalisation des anciens indices qui tient compte de :

- La différence de correction climatique : dans la base de données avant 2011 les dates exactes de la période mesurée ne sont pas renseignées, ce qui ne permet pas un calcul exact mais nécessite une approximation sur la correction climatique;
- La différence du pouvoir calorifique : la référence est passée du pouvoir calorifique inférieur (PCI) au pouvoir calorifique supérieur (PCS) en 2010. Par ailleurs, le PCS a été réévalué en 2021, mais les données utilisées dans cette étude sont antérieures à cette réévaluation ;
- La différence de surface de référence énergétique : la norme SIA régissant le calcul de la SRE a été modifié.

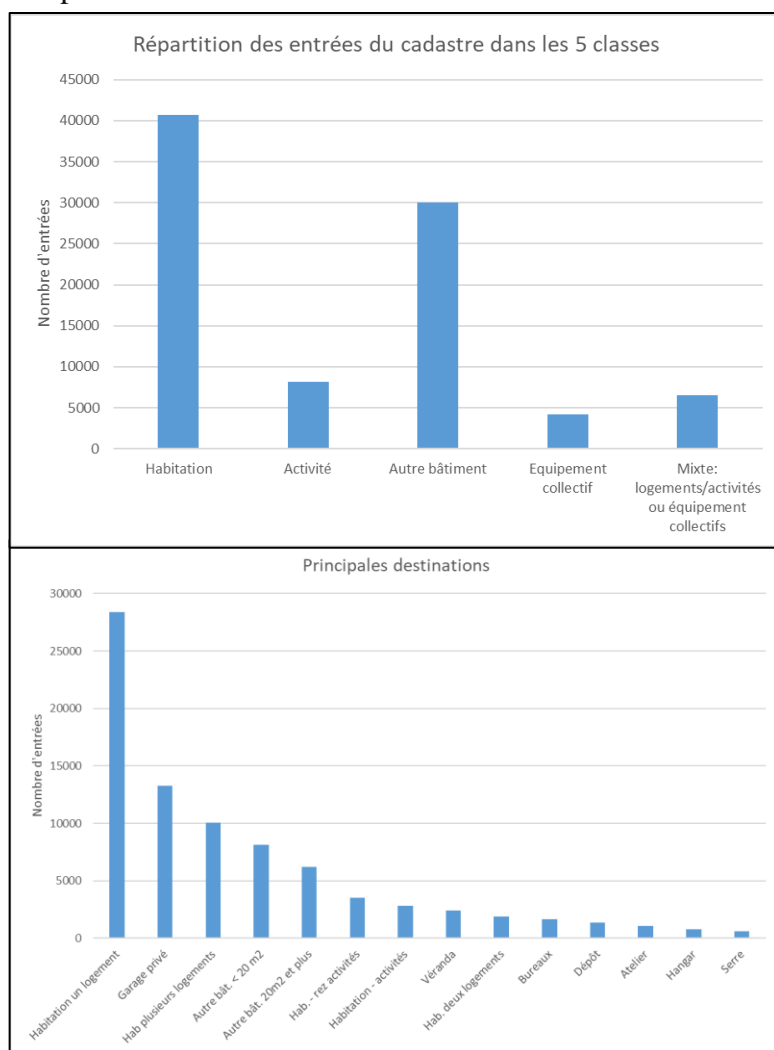
Une fois toutes ces corrections appliquées, l'analyse de la variation de la consommation de bâtiments spécifique autour de l'année 2010 présente toujours des effets statistiques particuliers. On peut citer comme exemple la variation standard des IDC 2010-2011 qui est largement supérieure à la variation annuelle standard rencontrée après 2011. De plus, il a été constaté qu'une grande partie des bâtiments n'ont pas recalculé leur SRE en 2010.

En outre, afin d'éviter d'influencer les résultats de cette étude avec le changement de méthodologie de 2010, il a été considéré uniquement les IDC après changement de la méthode. Il est également à noter que sur la quantité globale de correspondance entre les IDC et les autorisations de construire, la période avant 2010 ne représente qu'environ 30% des cas car les IDC antérieurs à 2010 étant moins nombreux.

Puis, concernant le changement du pouvoir calorifique du gaz introduit en mars 2021, l'effet sur les variations de consommation des bâtiments n'a pas été étudié. La problématique étant que les indices plus anciens peuvent-être recalculés sur une base volontaire avec la nouvelle définition du pouvoir calorifique mais ce n'est pas fait de manière systématique. Il a été estimé qu'il serait possible de mettre à jour cette étude ultérieurement en prenant en compte également les données dès 2021 afin de suivre l'évolution des effets des rénovations. Toutefois, pour assurer la continuité et la cohérence des données il serait nécessaire de recalculer la base de données IDC à partir des informations brutes saisies pour uniformiser le pouvoir calorifique et ne plus se baser sur les indices eux-mêmes.

Cadastre des bâtiments

En mars 2021, la couche SITG du cadastre des bâtiments contenait 89'552 entrées et 84'552 numéros distincts d'identifications de bâtiment (EGID). Chaque entrée correspond à un polygone (surface, hauteur, géolocalisation) et celui-ci peut correspondre à plusieurs numéros EGID. Les données sont réparties en cinq grandes familles d'affectations (« classes »), et également en catégories plus détaillées (destinations), qui sont au nombre de 115 (cf. Annexe A, Figure 1). Les classes qui contiennent le plus grand nombre de bâtiments sont « Habitation » et « Autres bâtiments ». Dans « Autres bâtiments » on retrouve principalement des garages ou autres petits bâtiments qui ne sont pas chauffés et ne sont pas concernée par cette étude.



Annexe A, Figure 1 – En haut : nombre d'entrées en fonction des cinq classes de la base de données du cadastre.
En bas : nombre d'entrées en fonction des principales destinations de la base de données du cadastre.

De plus, certaines données concernant l'époque de construction ne sont pas toujours bien renseignées dans la couche du cadastre. Ces informations sont consolidées par une autre couche bâtiments : « OCS_BATLOG_ADRESSE ». En outre, pour estimer la représentativité de la base de données IDC par rapport au total cantonal (surface et énergie consommée), les données du cadastre ainsi que les données de consommation d'énergie totale du canton compilées par l'office cantonal de la statistique ont été utilisées. Pour ce faire, la surface brute pour chaque bâtiment a été estimée à partir du cadastre de la manière suivante :

- Pour chaque numéro EGID n , nous calculons la surface brute $S_{brute}(n)$ comme :

$$S_{brute}(n) = \sum_i (Surface\ au\ sol_i) \cdot (Nombre\ de\ niveaux_i)$$

Avec

i	L'indice de chaque entrée du fichier du cadastre qui correspond au numéro EGID n (il peut y avoir plusieurs polygones qui correspondent à un même numéro EGID et qui sont sommés).
$Surface\ au\ sol_i$	La surface au sol du polygone qui correspond à l'EGID n et à l'entrée i
$Nombre\ de\ niveaux_i$	Le nombre de niveaux du polygone qui correspond à l'EGID n et à l'entrée i

Si le nombre de niveau n'est pas renseigné, il est estimé par l'approximation :

$$Nombre\ de\ niveaux_i = \frac{h_i}{3},$$

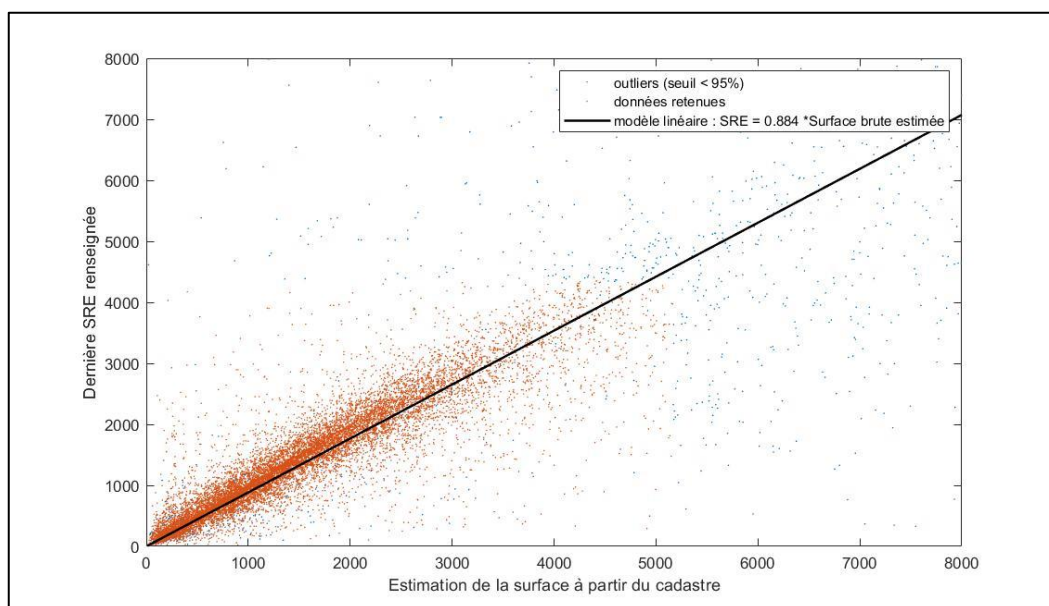
avec h_i la hauteur du polygone.

Tous les bâtiments du fichier du cadastre ne sont évidemment pas des bâtiments chauffés. Pour obtenir l'estimation la plus fiable possible quant à savoir quels bâtiments sont chauffés ou non, l'étude s'est basée sur les catégories d'utilisation indiquées, en éliminant tout d'abord la catégorie « Autres bâtiments » qui regroupe essentiellement des garages, ou des autres bâtiments vraisemblablement non chauffés.

Dans les sous-catégories restantes, il n'est pas toujours possible de trancher de manière certaine si le bâtiment est chauffé ou non, voir éventuellement maintenu hors gel. Il a donc fallu procéder par élimination afin de ne pas prendre en considération les hangars, les dépôts, les poulaillers, les silos, les réservoirs ou autres bâtiments qui ne sont vraisemblablement pas chauffés. Il faut souligner que ce deuxième filtrage n'a que très peu d'influence sur l'estimation globale de la SRE car la proportion de bâtiments concernés étant très faible par rapport aux catégories principales comme le résidentiel ou les locaux administratifs.

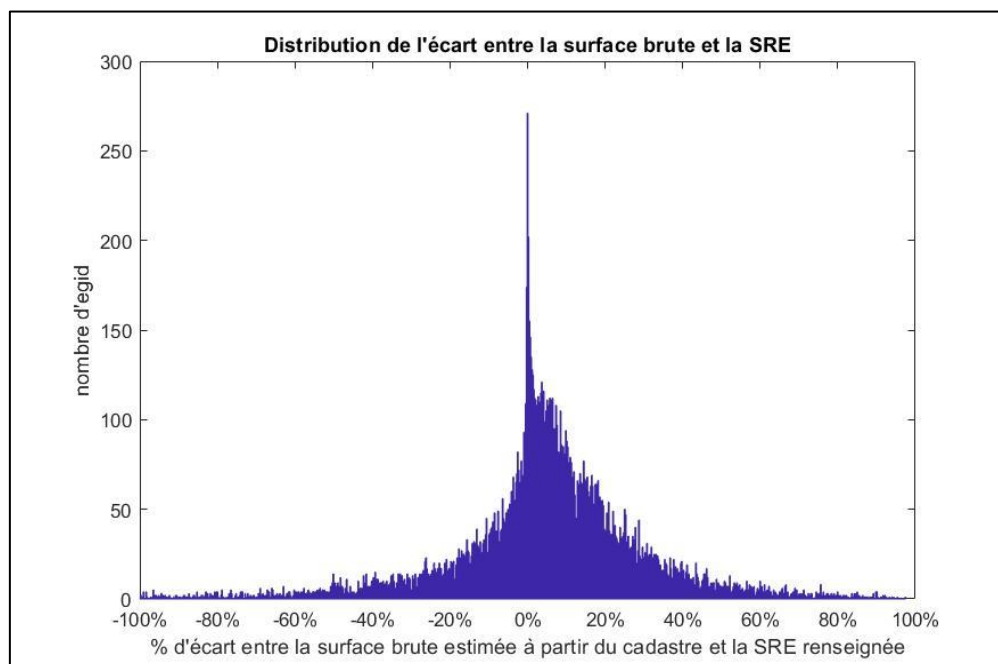
Pour estimer la surface totale chauffée, une comparaison a été effectuée entre les bâtiments pour lesquels la SRE est connue dans la base IDC et une estimation de la surface brute faite sur la base du cadastre (à partir de la surface au sol et du nombre de niveaux). Les points « outliers » résultants *a priori* de problèmes de données ne sont pas pris en considération (cf. Annexe A, Figure 2). Il en résulte une relation linéaire :

$SRE_{estimée} = a \cdot Surface_{brute}$. Avec $a=0.884\pm0.4\%$ (intervalle de confiance à 95%).



Annexe A, Figure 2 – Relation entre surface brute et surface chauffée

Toutefois, il est à noter que pour un nombre important de bâtiments, la SRE renseignée et la surface brute coïncident (cf. Annexe A, Figure 3), ce qui semble être le signe qu'une partie des bâtiments n'ont en réalité pas fait l'objet d'un calcul sérieux de leur SRE.



Annexe A, Figure 3 - Relation entre la surface brute et la surface chauffée. Le pic du nombre d'EGID à 0% indique probablement que la SRE n'a pas été correctement calculée.

Pour mettre en relation la variation des IDC avec la demande thermique globale cantonale, il est nécessaire de connaître l'évolution de la surface chauffée. Ainsi, pour chaque bâtiment, une année de construction (ou une fourchette de quelques années) est indiquée. Puis, cette valeur est reprise et pour chaque année, seulement a été considéré la surface des bâtiments postérieure à cette date. Dans le cas des bâtiments où l'information disponible concernant la

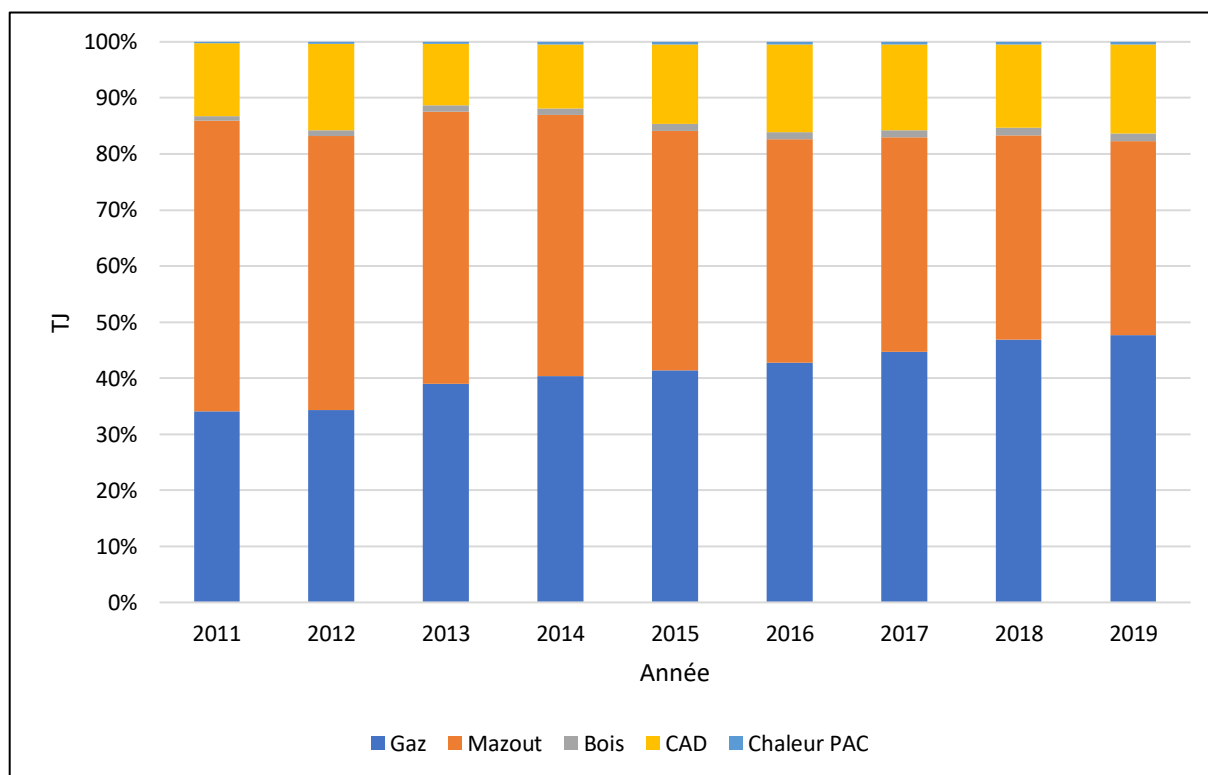
période de construction est par exemple 2005-2009, nous ajoutons au prorata 20% de la valeur de la surface du bâtiment sur chaque année entre 2005 et 2009, puis 100% dès 2009. Toutefois, ce calcul ne prend pas en compte la surface chauffée potentiellement démolie pour permettre la construction d'un nouveau bâtiment. On peut donner l'exemple suivant : une villa de 200 m² remplacée par un immeuble de 4'000 m² correspond à une extension de la surface chauffée cantonale de 3'800 m². Pour tester la sensibilité de ce taux de démolition-reconstruction par m² de surface neuve, le calcul a été effectué avec deux taux: 5% et 20% de la surface. Par ailleurs, la présente étude a tenté de reconstruire cette évolution en partant de versions plus anciennes de la base de données du cadastre. Cependant, il semble que des corrections et diverses suppressions ont été effectuées dans la version la plus à jour, ce qui rend cette méthode difficilement applicable.

Dans le cadre de cette étude, l'évolution temporelle du parc immobilier genevois est primordiale, or les données disponibles en ligne représentent l'image actuelle statique du parc bâti. Dès lors, pour estimer cette évolution temporelle de la surface bâtie quelques années en arrière, les hypothèses suivantes pour chaque EGID ont été prises :

- Si aucune indication n'est donnée sur l'époque ou sur l'année de construction, il ne s'agit *a priori* pas d'un bâtiment récent car sinon les données sont généralement complètes. Ce bâtiment est tout de même comptabilisé. L'effet engendré par cette hypothèse peut être une légère sous-estimation de l'augmentation de la surface chauffée ;
- Si l'année de construction est renseignée (environ 12 % des cas), alors la surface correspondante est soustraite au total actuel pour toutes les années inférieures à l'année de construction ;
- Si uniquement l'époque de construction est renseignée, la SRE de l'EGID correspondant est ajoutée au *prorata* sur chaque année de l'époque de construction. Par exemple, pour un bâtiment de 1'000 m² construit sur la période 1991-2000, 100 m² par année ont été ajoutés entre 1991 et 2000 ;
- Afin de tenir compte de la surface potentiellement démolie (par exemple un ancien bâtiment chauffé démoli, puis remplacé par un nouveau plus grand), un taux moyen de surface démolie par nouvelle surface construite a été estimé. Pour chaque projet spécifique, ce taux peut varier entre 0%, c'est-à-dire qu'aucune surface chauffée n'a été démolie pour construire un nouveau bâtiment et 100%, ce qui correspondrait par exemple à la démolition-reconstruction d'un bâtiment avec la même surface chauffée. Le calcul a été fait avec les hypothèses d'un taux entre 5% et 20% de la surface afin de tester la sensibilité de cette hypothèse ;
- Le calcul d'estimation de la surface chauffée a été reproduit sur la base d'ancienne version du cadastre (janvier 2014) dans l'idée de pouvoir estimer plus précisément le taux de remplacement d'anciennes surfaces chauffées par des nouvelles. Toutefois, il semblerait que les fichiers ne permettent pas une telle comparaison directe et que des données aient été revues (surfaces, catégories). En effet, avec le même calcul que pour la version actuelle, l'estimation obtenue de la SRE totale s'établit à 37,5 mio de m² chauffés, alors que celle obtenue par soustraction au total actuelle des bâtiments construits après 2013 donne 43 mio de m² (contre 45.6 mio fin 2020).

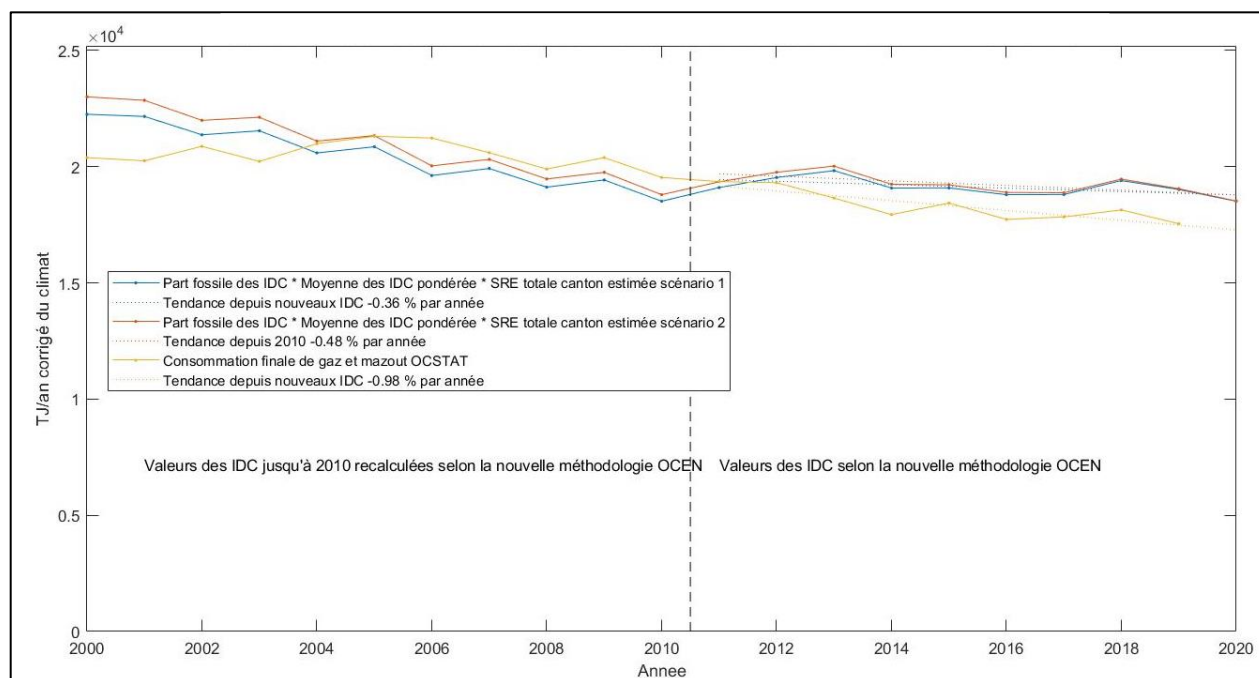
Ensuite, pour comparer les tendances de consommation d'énergie fossile entre les valeurs de l'OCSTAT et les données IDC, l'étude se base sur le modèle d'évolution de la SRE décrit précédemment, sur la valeur moyenne des IDC pondérée par la SRE à laquelle il a été appliquée une correction climatique équivalente à la méthode de la directive IDC (70% des valeurs de l'OCSTAT pour le gaz et le mazout – les 30% restants correspondant à une consommation supposée indépendante du climat). La part fossile des IDC est calculée en excluant l'électricité et les pompes à chaleur, le bois et les agents « autres ». Pour ce qui est des réseaux de chauffage à distance (CAD), l'hypothèse prise est que l'énergie finale provient à 80% d'énergies fossiles.

Dans la base de données IDC, la part de mazout diminue principalement au profit du gaz (cf. Annexe A, Figure 4), tandis que la part des CAD n'augmente pas de manière significative. Le bois et la chaleur des pompes à chaleur restent marginaux.



Annexe A, Figure 4 - Consommation d'agents énergétiques renseignées dans la base de données IDC

Dans les deux cas (OCSTAT et calcul sur la base des IDC), la tendance de la consommation d'énergie fossile est la baisse (-0.98% par année pour l'OCSTAT, et entre -0.35% et -0.47% par année pour l'estimation à partir du parc IDC, cf. Annexe A, Figure 4). En valeur absolue, certaines années coïncident de manière assez précises (2007-2010). En raison des changements de méthodologie sur le calcul des IDC les tendances sont uniquement calculées à partir de 2011.

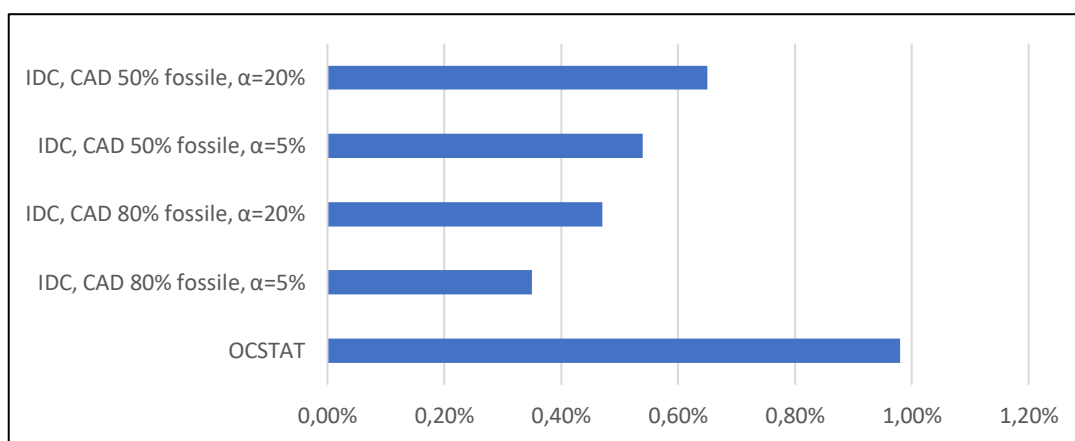


Annexe A, Figure 5 – Estimation de l'évolution de la consommation d'énergie fossile à Genève et comparaison avec les valeurs de l'OCSTAT

l'estimation à partir du parc IDC étant supérieure à la consommation d'énergie fossile selon l'OCSTAT. Les hypothèses utilisées pour l'estimation de la surface chauffée cantonale, les méthodes de correction climatiques imparfaites ou d'autres sources d'incertitudes telles que la qualité des saisies dans la base IDC (unités, SRE) peuvent justifier l'écart relatif obtenu. En revanche, sur la l'évolution tendancielle, l'effet de ces facteurs d'incertitudes paraît faible pour expliquer l'écart obtenu : dans le cas de l'OCSTAT la baisse tendancielle de consommation d'énergie fossile est de 0.98% par année, tandis que la baisse estimée sur la base des IDC serait entre 0.36% et 0.48% selon le taux de remplacement d'anciennes SRE. Les hypothèses suivantes ou une combinaison de ces hypothèses pourrait contribuer à expliquer cet écart de tendance :

- La consommation d'énergie fossile des bâtiments hors parc IDC (villa) diminue de manière plus rapide que celles des bâtiments du parc IDC. Cela pourrait contribuer à expliquer une surestimation de la consommation d'énergie fossile à partir des IDC. Par exemple le passage à des pompes à chaleur à large échelle pour les villas ;
- Le suivi fait par l'OCSTAT des consommations de mazout pourrait ne pas couvrir la totalité des combustibles vendus. En effet, étant donné la méthode déclarative utilisée pour cette récolte des données, il se pourrait que l'OCSTAT sous-estime la consommation, contrairement au gaz dont la vente est centralisée par SIG. Toutefois, cette hypothèse semble contredite car la quantité totale de mazout de la base IDC diminue plus rapidement que les ventes de mazout compilées par l'OCSTAT (cf. Annexe A, Figure 4);
- Le taux de SRE détruite / SRE construite pourrait être sous-estimé ;

- La part non fossile globale des CAD a augmenté de manière significative depuis 2011 et par conséquent, le facteur 80% fossile utilisé ici pour la chaleur des CAD tend à surestimer la consommation d'énergie fossile du parc IDC. Le même calcul avec l'hypothèse optimiste que l'énergie des CAD serait à 50% renouvelable diminue un peu l'écart entre les deux méthodes mais ne suffit toutefois pas à le combler (cf. Annexe A, Figure 6). Une analyse plus approfondie serait nécessaire pour comprendre cette différence entre ces deux sources de données et ainsi, mieux comprendre les mécanismes de baisse de consommation d'énergie fossile.



Annexe A, Figure 6 - Tendence annuelle de baisse de consommation d'énergie fossile

Annexe B – Eléments complémentaires concernant les mots-clefs pour le filtrage sur les demandes d'autorisation de construire

La liste complète des mots-clefs utilisés pour cibler un impact énergétique potentiel dans une autorisation de construire est reproduite ci-dessous (la fin de certains mots est volontairement incomplète pour éviter d'écarter des intitulés pertinents pour une faute éventuelle d'orthographe ou d'accord).

création d'un logement aux combles	fermeture d'une loggia	fermeture des balcons
surélévation de bâtiments	fermeture loggia	fermeture des loggias
rénovation et surélévation	fermeture terrasse	fermeture d'un balcon
surélévation superstructure	isolation	amélioration énergétique de l'env
transformation et surélévation	isolation des façades	rénovation et transformation d'un bâtiment
aménagement combles	isolation et rénovation	rénovation de 11 immeubles
transformation attique	isolation façades	rénovation de trois immeubles
dans les combles	isolation périphérique	rénovation d'un bâtiment
transformations des combles	mise aux normes thermique	rénovation - transformation
aménagement logements dans les combles	modification des façades	rénovation du bâtiment
transformation combles	rénovation complète de la toiture	rénovation de bâtiment
construction attique	rénovation de façade	rénovation des immeubles
construction d'une attique	rénovation de la faç	rénovation de 4 immeubles
aménagement de combles	rénovation de la toiture	rénovation de 3 immeubles
surélévation immeub	rénovation de l'enveloppe	isolation d'un bâtiment
surélévation bâtimen	rénovation de toiture	rénovation et isolation
agrandissement d'un bâtiment	rénovation des façades	rénovations d'un bâtiment
agrandissement bâtiment	rénovation des toiture	rénovation de deux immeubles
agrandissement villa	rénovation d'une façade	rénovation extérieure d'un immeuble
extension bâtiment	rénovation d'une toiture	rénovations immeuble
chaudière	rénovation envelop	rénovation d'immeuble
chauffage	rénovation extérieure	rénovation d'immeubles
chaufferie	rénovation façades	rénovation immeuble
production de chaleur	rénovation partielle de la façade	rénovation d'un immeuble
production de chaud	rénovation partielle d'un immeuble	rénovation de 2 immeubles
production ecs	rénovation toiture	rénovation d'une maison
rénovation façade	rénovations des façades	transformation et rénovation d'un bâtiment
amélioration thermique	rénovations extérieures	rénovation d'immeubles
enveloppe thermique	transformation bâtiment	
fermeture de loggias	transformation toiture	
rénovation des vitrages	rénovations bâtiments	

rénovation des fenêtre	rénovation et réaffectation	
verre isolant	rénovation et surélévation	
changement des fenêtre	rénovation et transformation immeuble	
rénovation fenêtres	transformation hôtel	
remplacement fenêtre	transformation d'un bâtiment	
remplacement des vitrages	restauration immeuble	
remplacement des fenêtres	changement de fenêtres	
modifications lucarnes	réfection immeuble	
rénovation de fenêtres	transformation villa	
nouvelles fenêtres	transformations immeubles	
poses de verres isolants	transformation maison	
panneaux solaires	transformation immeuble	
solaire thermique	reconstruction après incendie	
panneaux solaires	rénovation bâtiment	
photov	rénovation immeuble	
capteurs	verres isolants	
panneaux solaires thermiques	remplacement des stores et des fenêtre	
géo therm	remplacement des volets et des fenêtre	
geoth	changement de vitrage	
pac air	remplacement de fenêtre	
pompe à chaleur	double vitrage	
pompe a chaleur	vitrages	

Cette liste a été construite de manière empirique et par tâtonnements successifs : à chaque ajout de mot-clef dans la liste, il a été identifié manuellement quelques autres intitulés restants avec impact énergétique potentiel, ainsi de suite jusqu'à ce que les intitulés restants (qui ne contiennent aucun des mots-clefs de la liste) ne semblent vraisemblablement plus indiquer de travaux de rénovation.

La grande majorité des intitulés « non-énergétique » restants concernent des travaux d'aménagements extérieurs ou intérieurs (rénovation d'appartements, aménagements de commerce, etc.), ainsi que diverses installations soumises à autorisation (par exemple : antennes téléphoniques). Pour faciliter le travail de classement, une autre liste de mots-clefs a également été utilisée pour écarter les travaux non-énergétique facilement identifiables (par exemples : « aménagements extérieurs », « ecopoint », « trottoir », « antenne », « collecteur », etc.). Cela a permis de réduire la liste restante et simplifier la recherche de mots-clefs pertinents. Au total, 4% des intitulés totaux ne figuraient ni dans la catégorie « énergie », ni dans la catégorie « autres travaux ». Ces 4% ont été rapidement parcouru visuellement, et ne semblaient plus contenir de travaux à impact énergétique potentiel.

Par ailleurs, une tentative a été menée pour essayer d'établir des catégories de travaux selon les mots-clefs trouvés (rénovations globales ou partielles), mais les intitulés ne sont généralement pas suffisamment précis pour faire une telle distinction (même manuellement).

Quelques exemples d'intitulés de travaux (avec en couleur les intitulés reconnus avec impact énergétique potentiel selon la recherche par mot-clef)

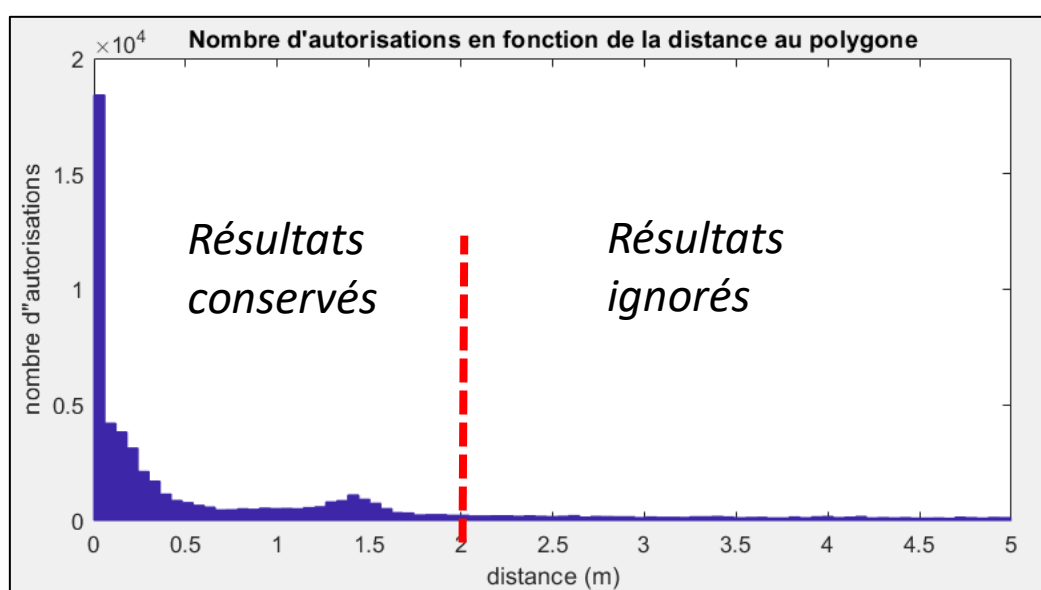
couvert pour stockage
remplacement des vitrages sur façade rue
aménagement et transformation de l'espace personnel au 2ème étage
Installation d'une cabine de peinture au pistolet
transformation de locaux sanitaires au rez-de-chaussée et au 1er étage
escalier de liaison entre appartements aux 2ème et 3ème étages
installation d'un nouveau système automatique de contrôle et paiement de taxes - démolition caisses actuelles - travaux de serrurerie et maçonnerie divers - éclairage de secours
"Restaurant scolaire" installation de rafraîchissement d'air pour la SALLE DU RONDEAU
remplacement des fenêtres
(clinique des Grangettes) couverture de la terrasse, de la cafétéria -@véranda
réfection des façades
transformations intérieures d'un hôtel
aménagement d'un biotope de 3 étangs et d'un ruisseau
escalier intérieur entre rez-de-chaussée et le sous-sol
(citerne enterrée) création d'un local pour une citerne journalière
division d'ateliers
changement d'affectation d'un logement en 2 salles de classes et transformation de locaux en 2 salles de classes (changement d'affectation d'un logement en 2 salles de classes et transformation de locaux en 2 salles de classes) transformation d'un seul appartement en deux classes au 3ème étage
(modifications intérieures bureaux aux 1er, 2, 3, 4 et 5ème étages) adjonction d'une grille roulante à l'entrée d'immeuble
(aménagement d'un café restaurant) extension de l'établissement
aménagement de dépôts de livres pour la Bibliothèque d'Art & d'Archéologie
construction d'une véranda, agrandissement balcon et isolation extérieure du bâtiment
changement d'affectation d'arcades en bureaux
agrandissement commerce
aménagement d'un cabinet médical au rez-de-chaussée
remplacement des fenêtres
isolation périphérique des bâtiments - remplacement des fenêtres et des chaudières (isolation périphérique des bâtiments - remplacement des fenêtres et des chaudières) installation de capteurs solaires en toiture

Annexe C – Illustration du procédé de géomatique pour le croisement entre les données des demandes d'autorisation de construire et les bâtiments

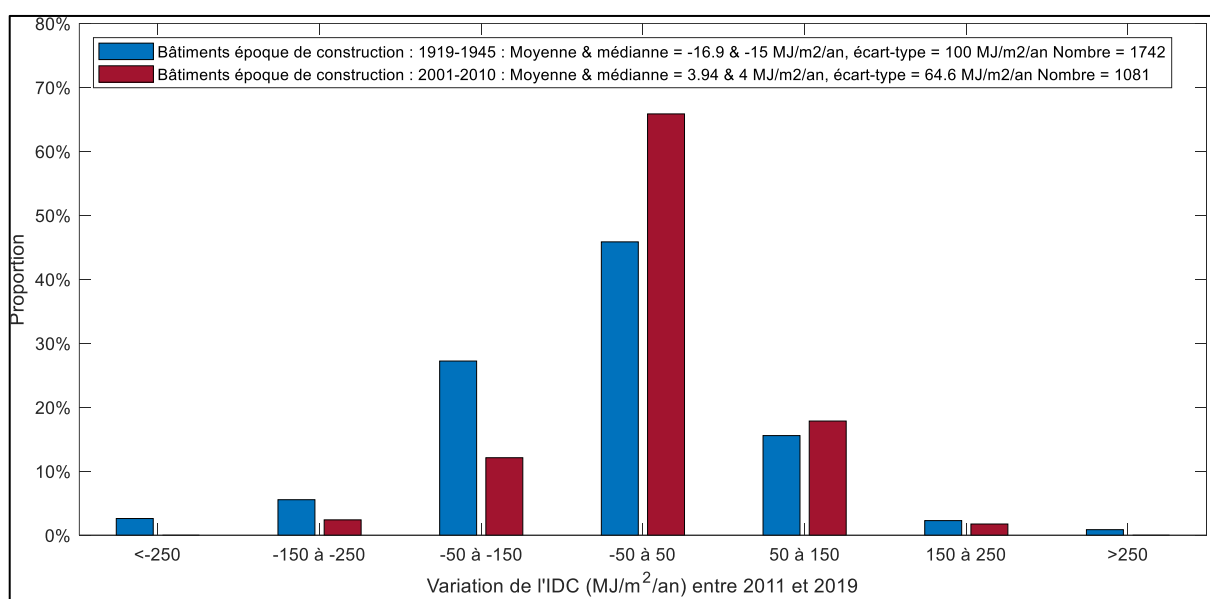
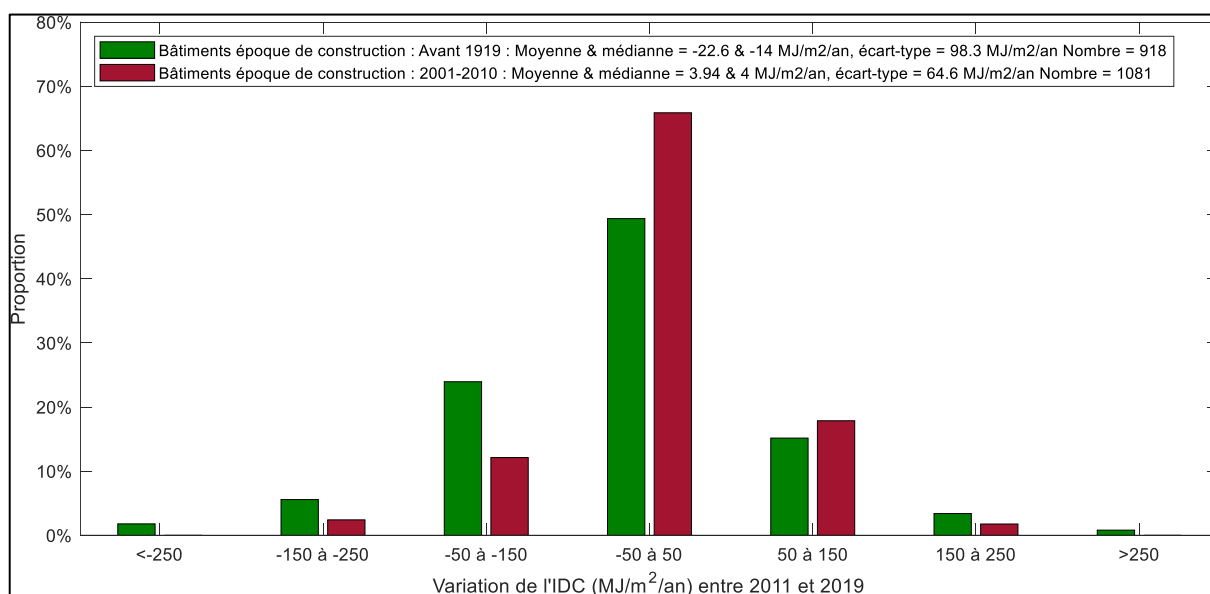
Exemple de l'attribution du numéro EGID du bâtiment le plus proche à chaque autorisation de construire (autorisation par EGID) : le positionnement peut être soit à l'intérieur du polygone, soit à l'extérieur :

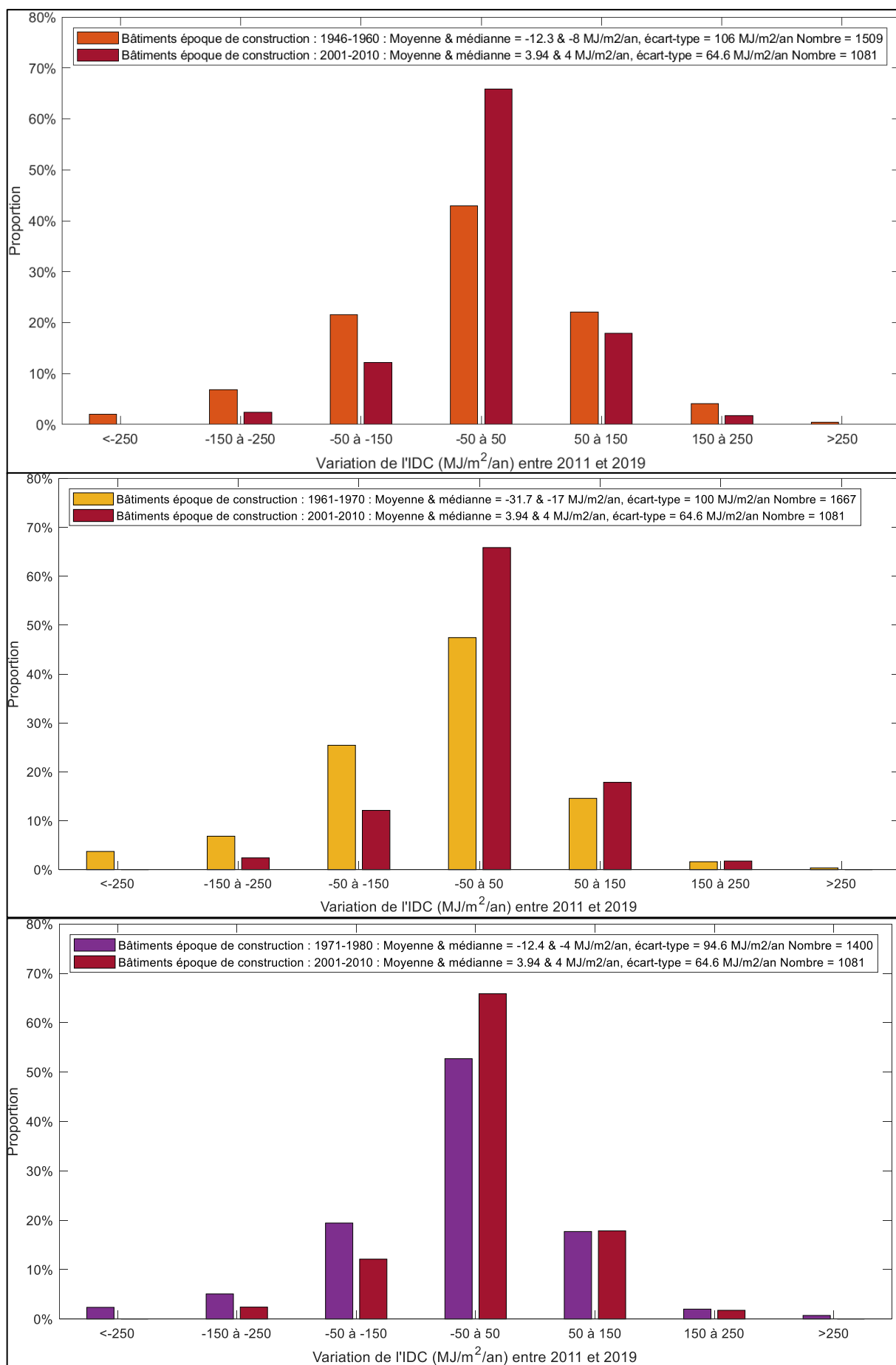


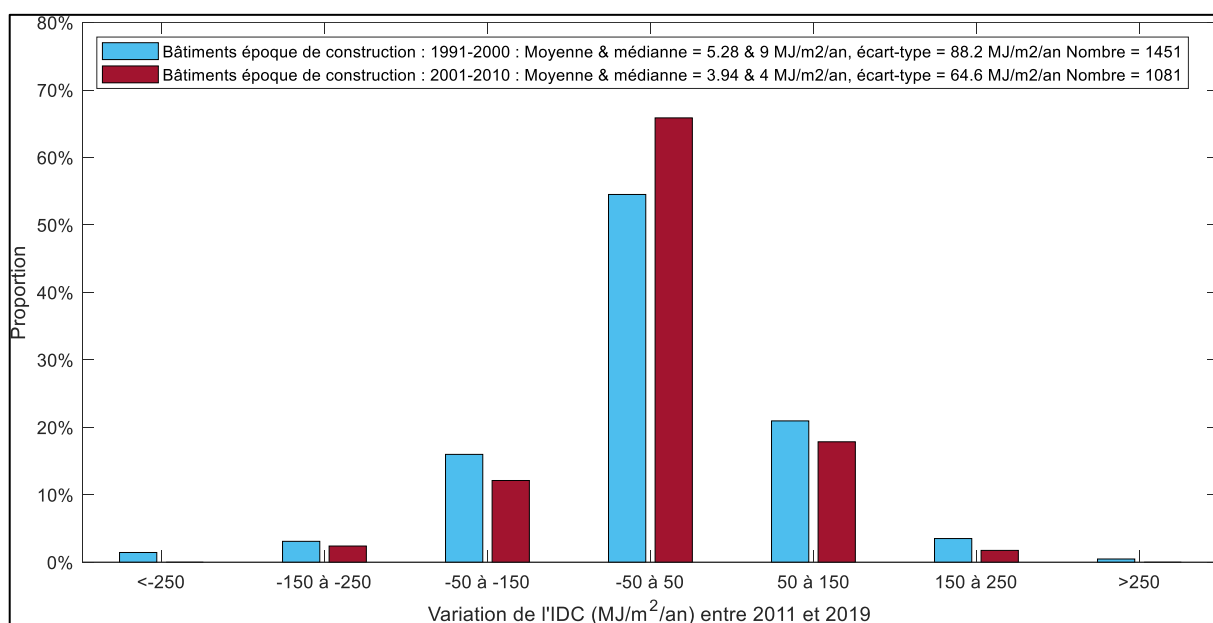
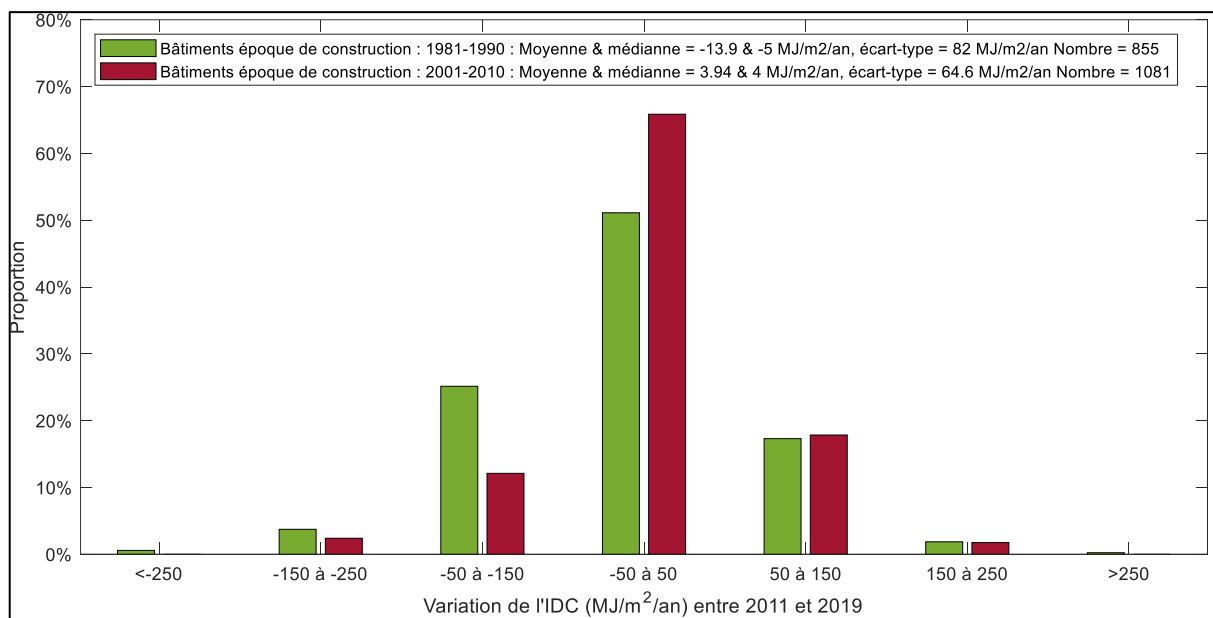
Représentation graphique du nombre de demandes d'autorisation de construire conservés et ignorés :



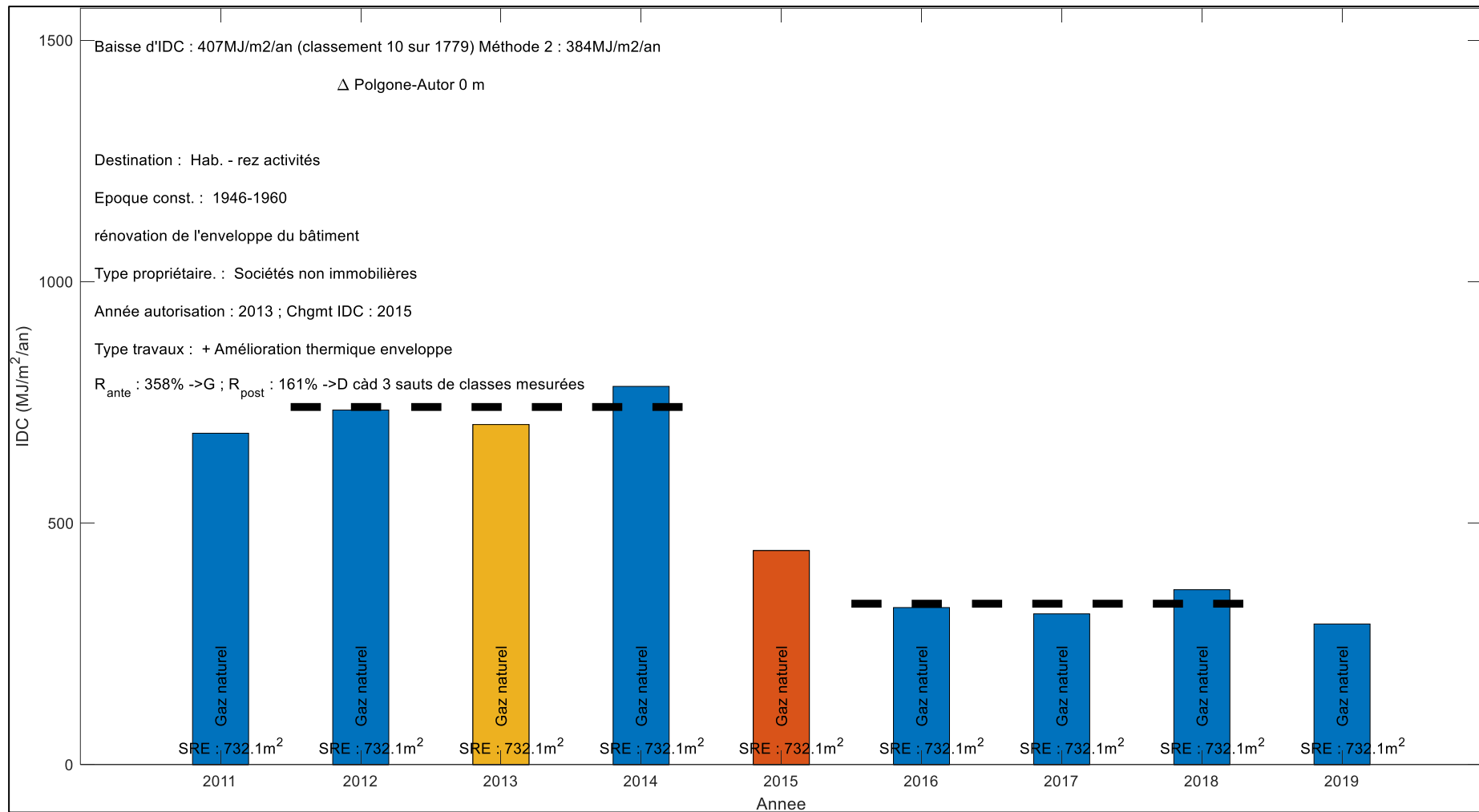
Annexe D – Distribution de la variation des IDC entre 2011 et 2019 pour les différentes époques de construction

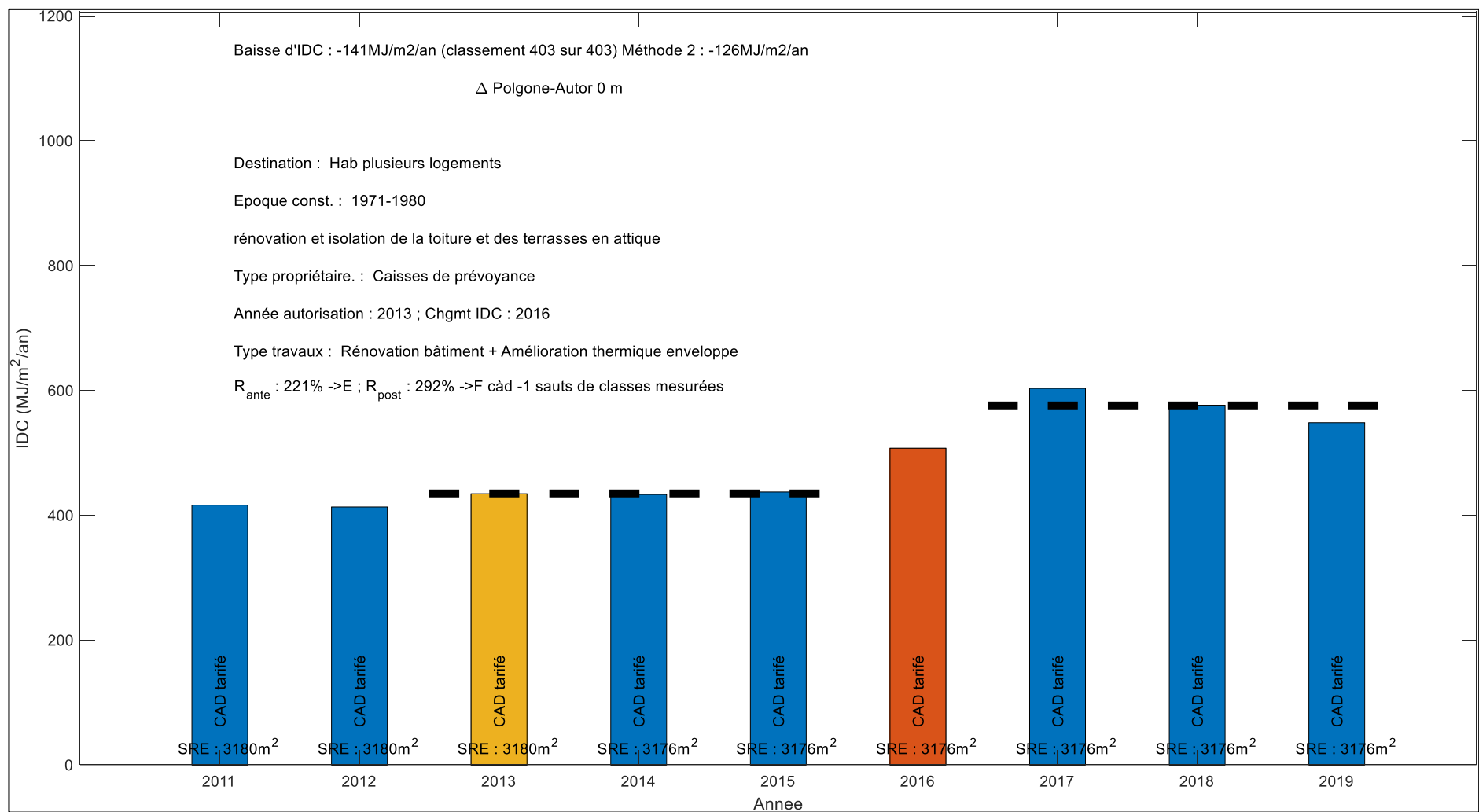


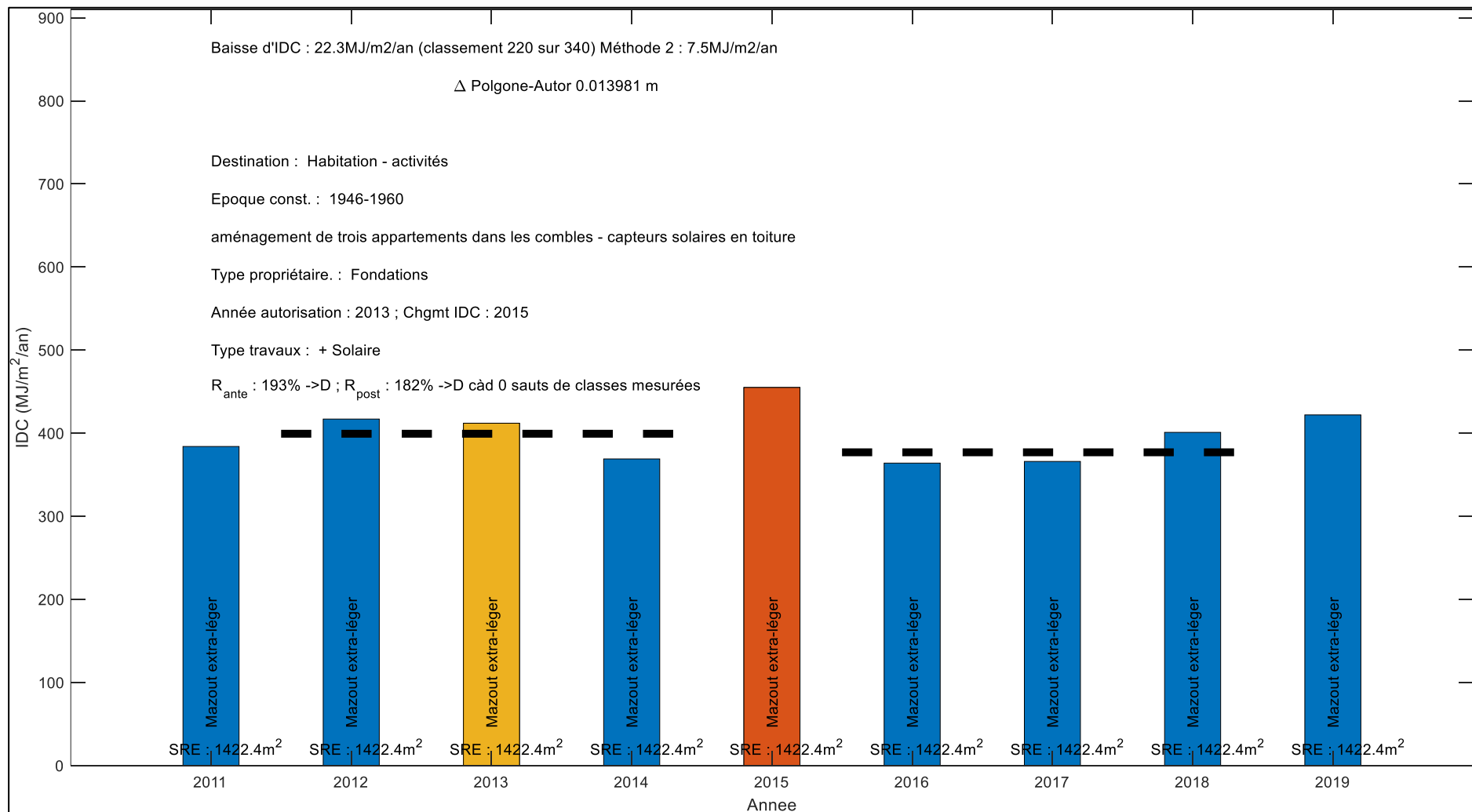




Annexe E – Visualisation d'exemples des résultats individuels du fonctionnement de l'algorithme

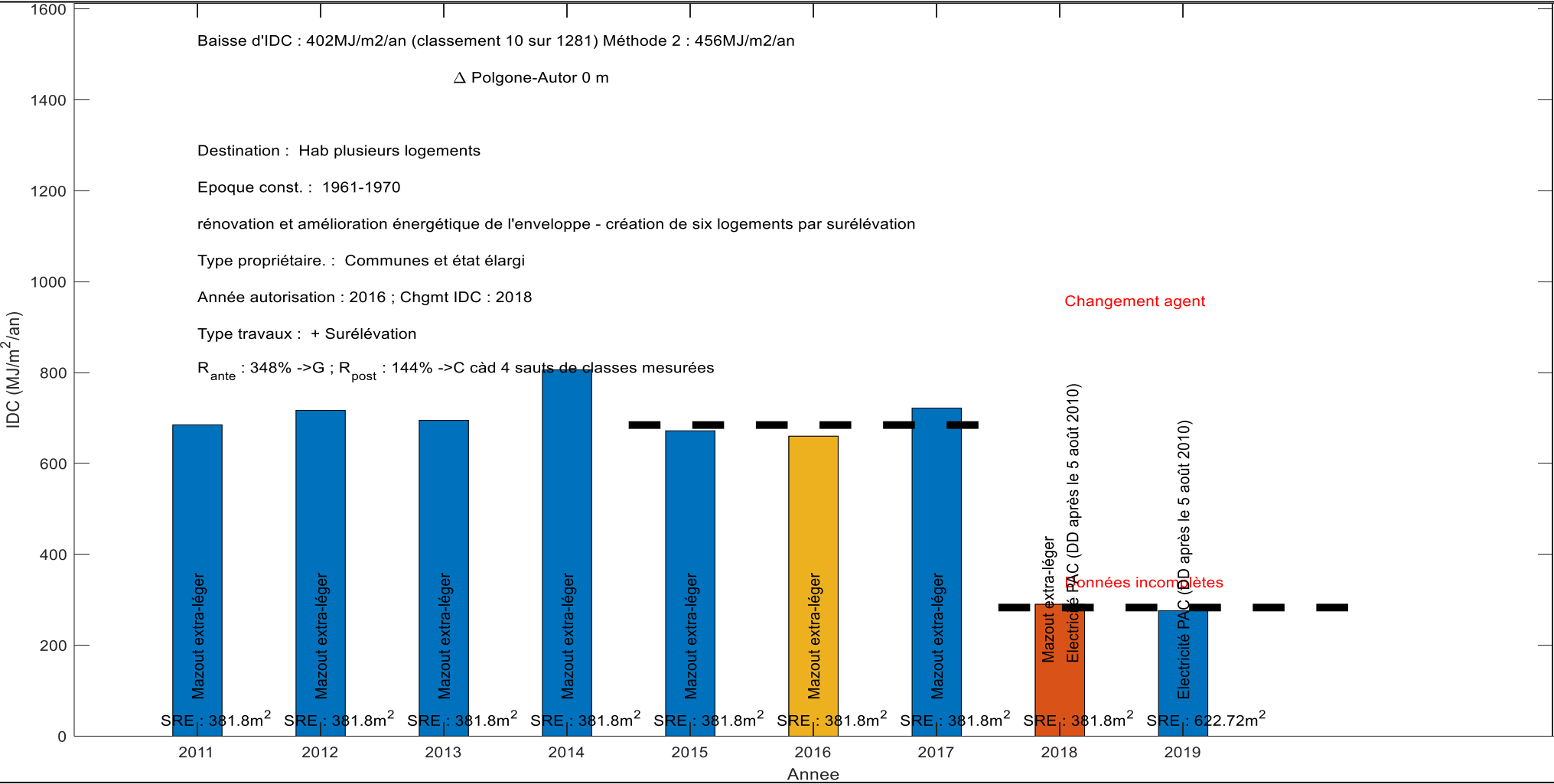


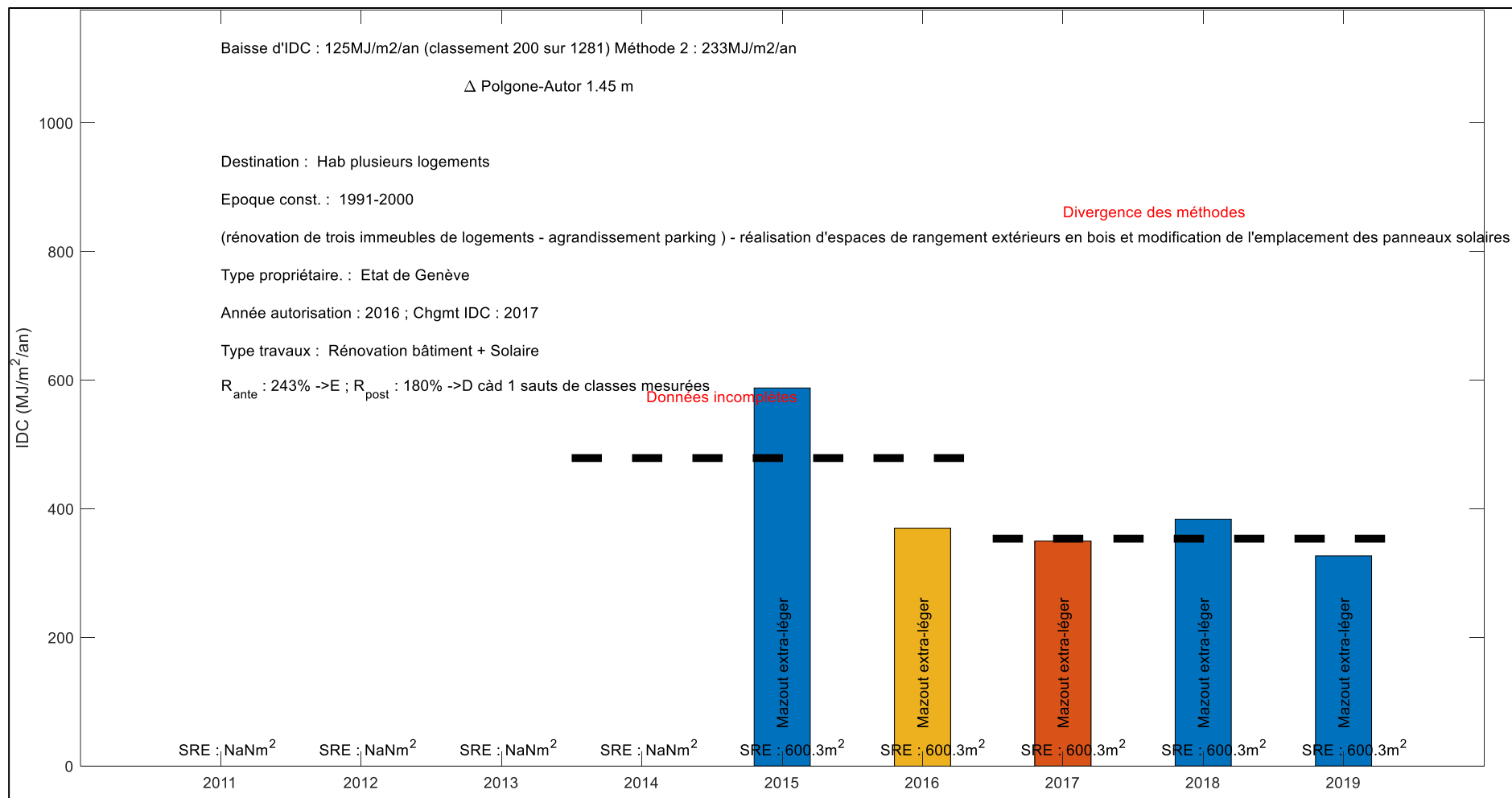


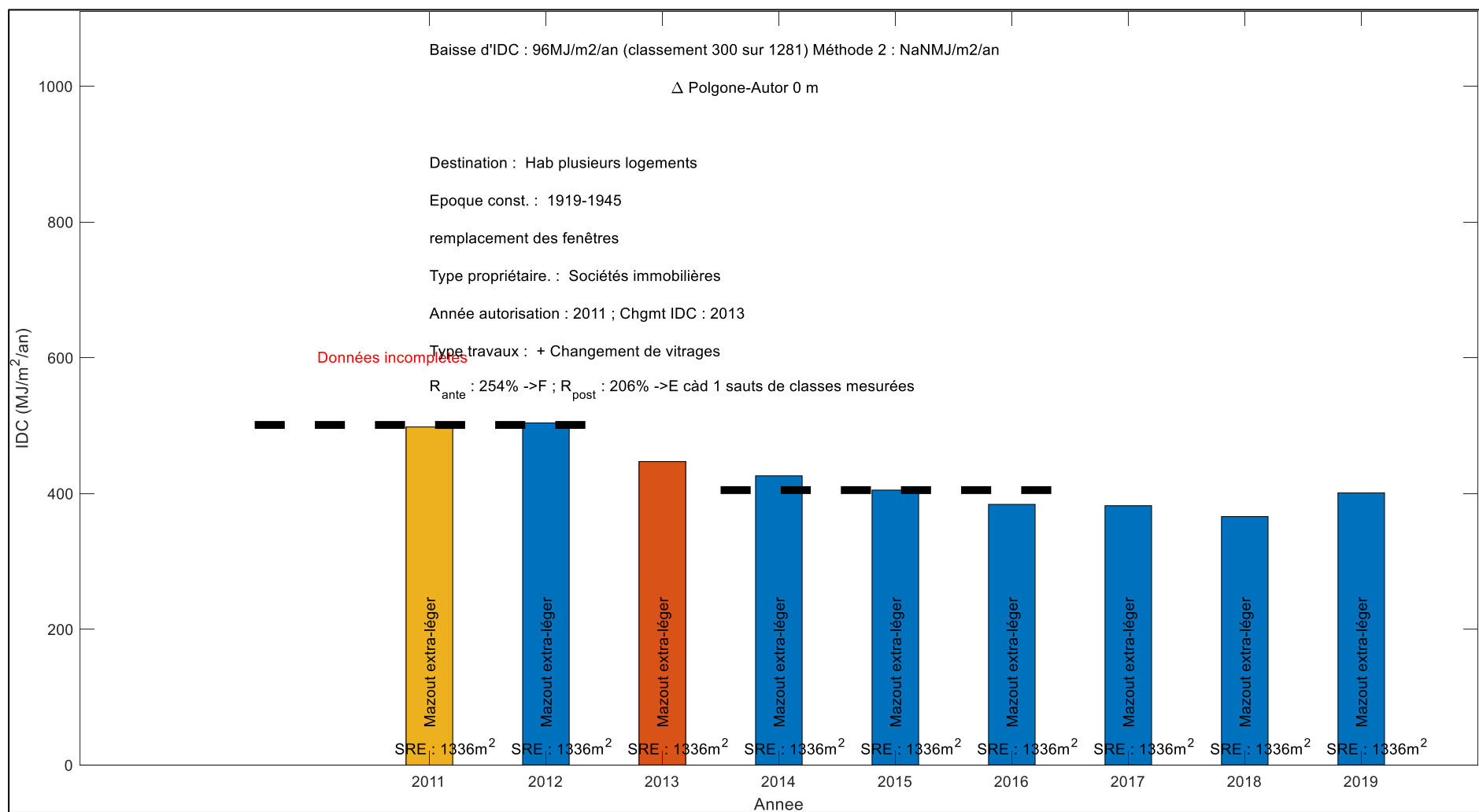


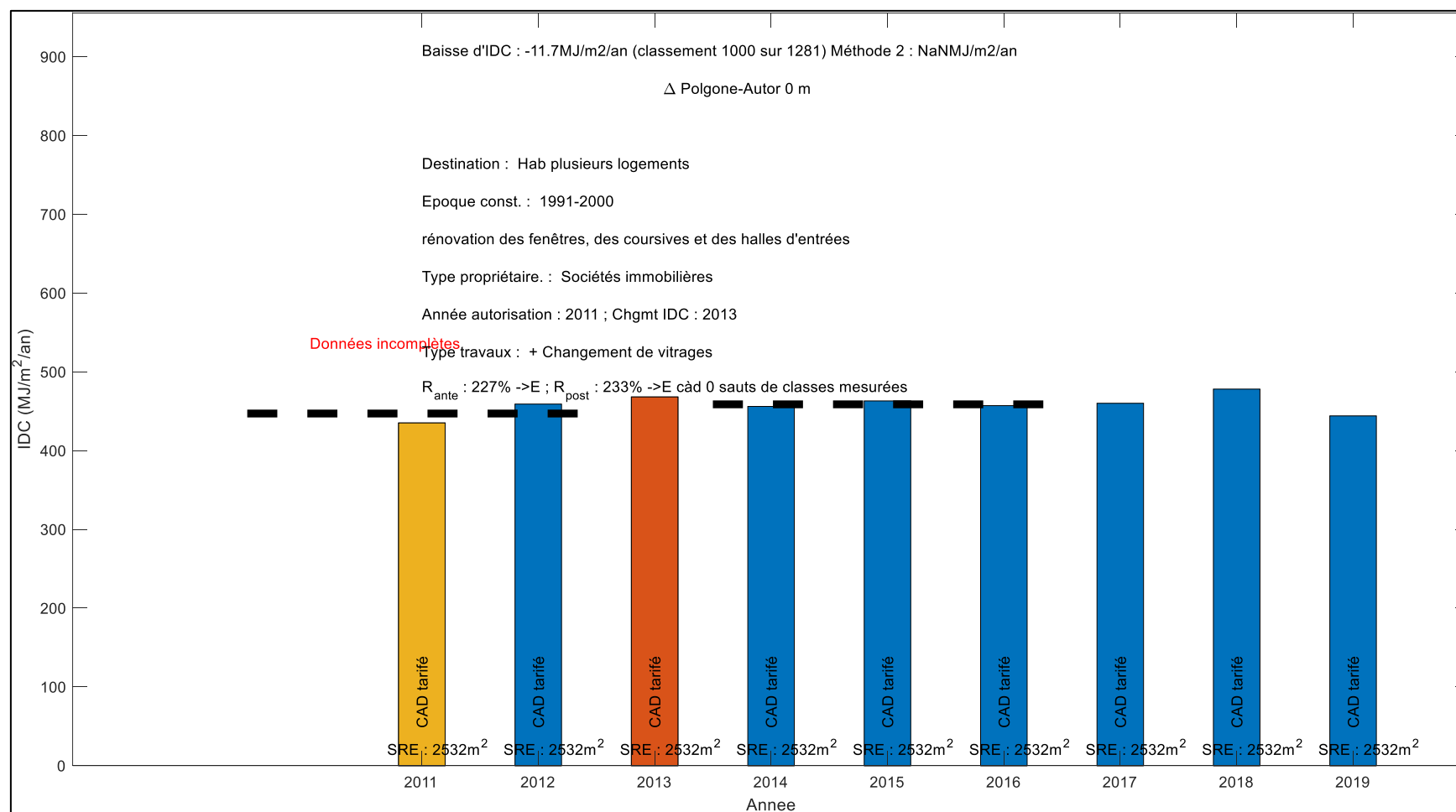
Annexe E

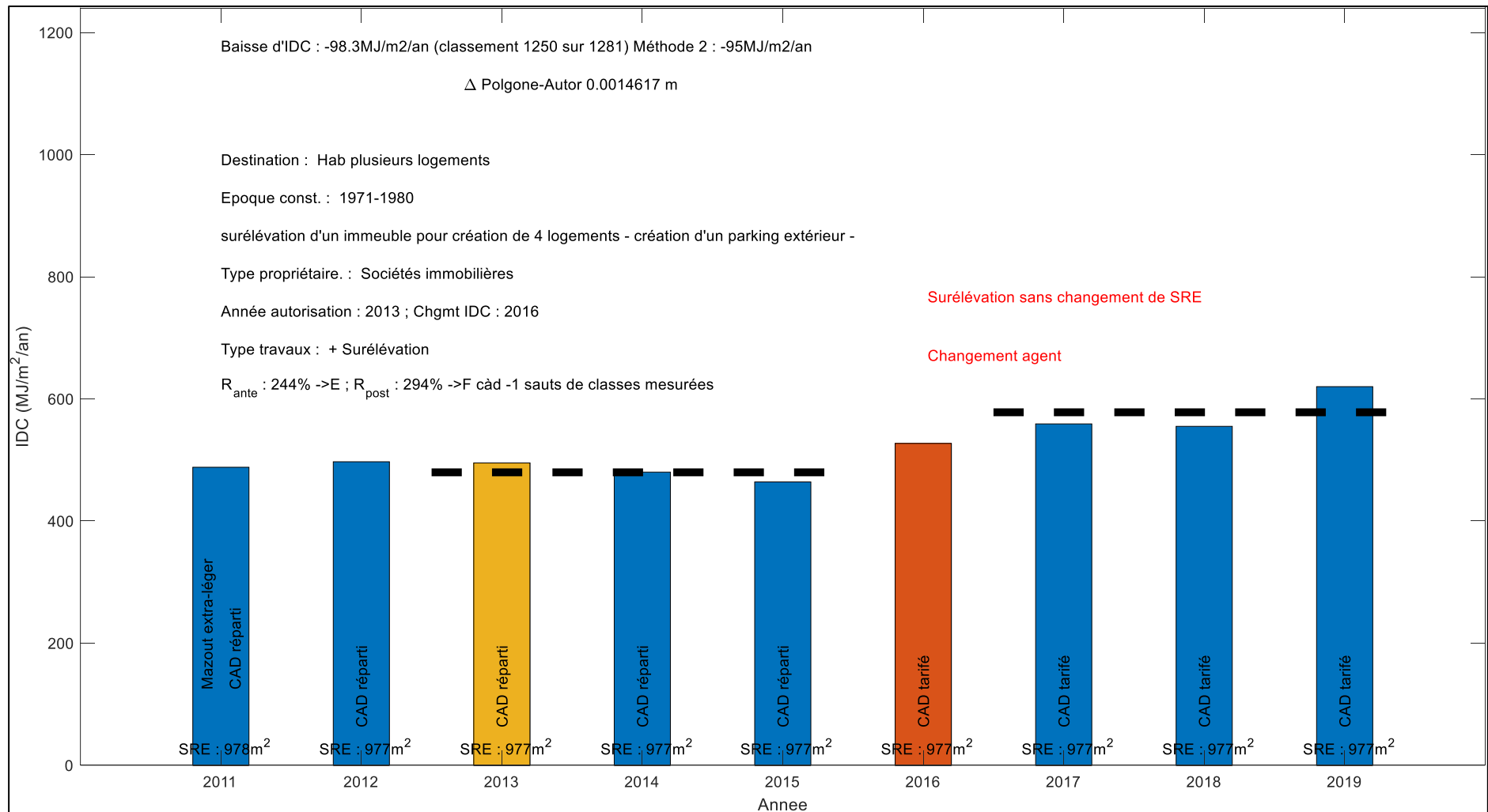
Quelques exemples de visualisation des résultats individuels (résultats issus des données les moins fiables, par exemples : données incomplètes, changement d'agent énergétique, etc.) :



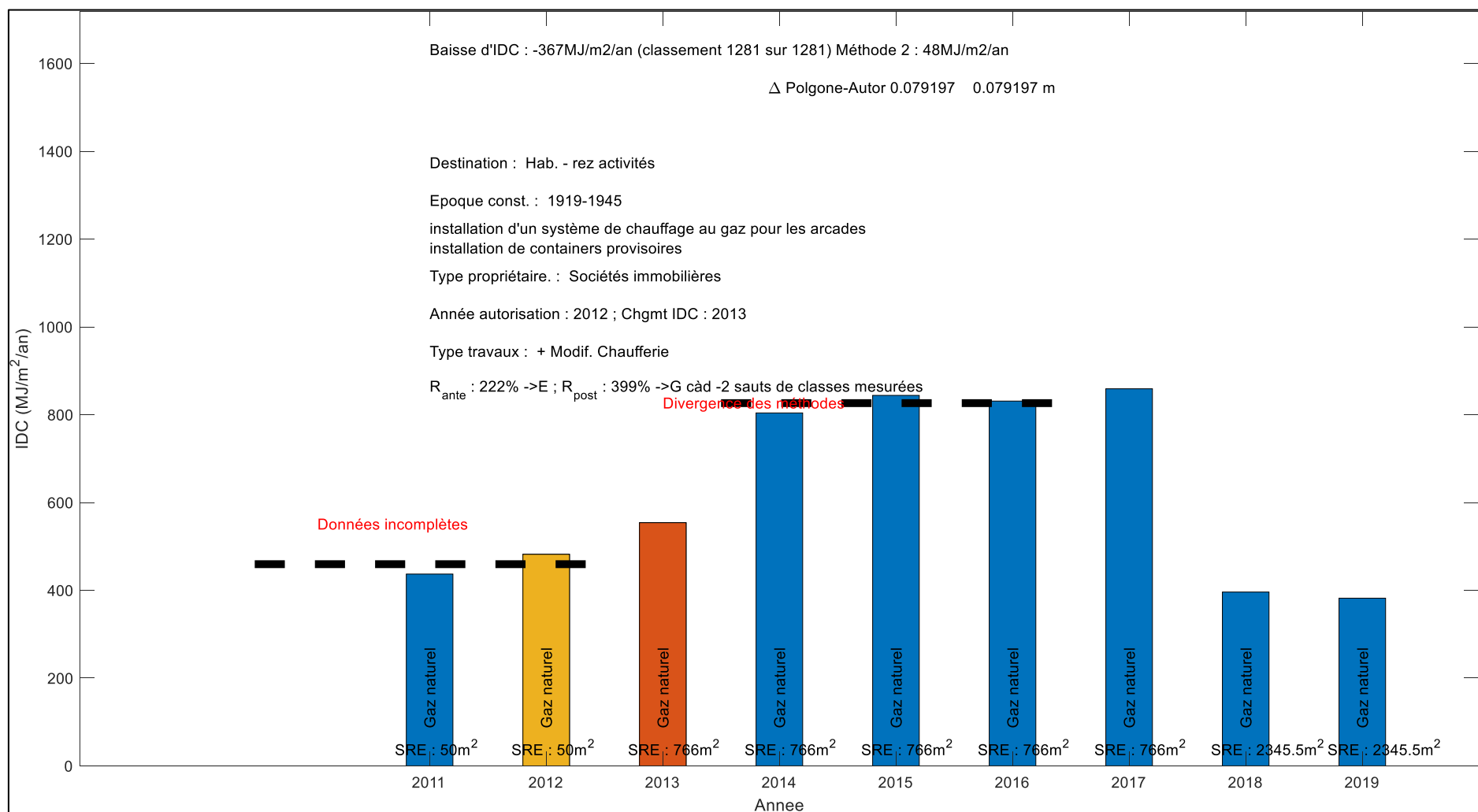






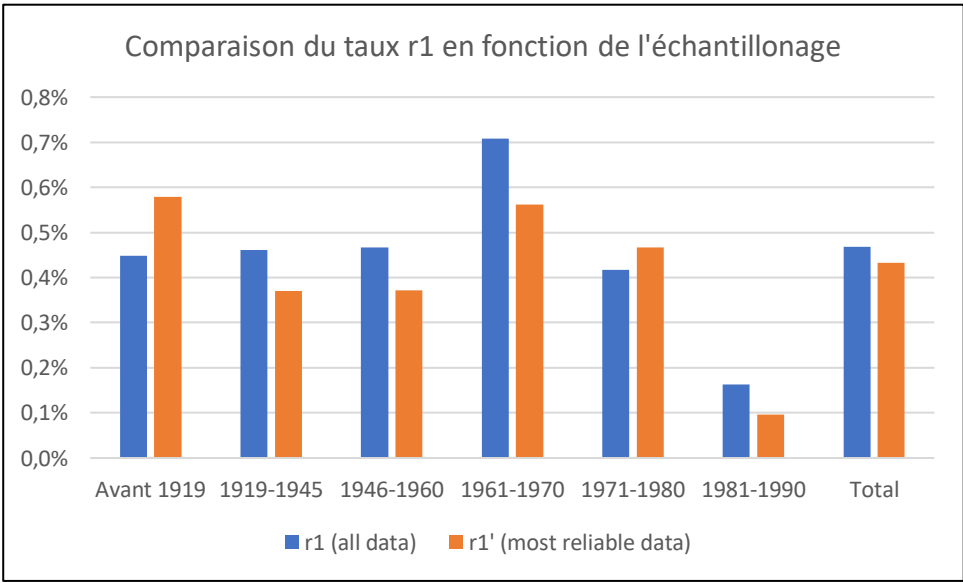
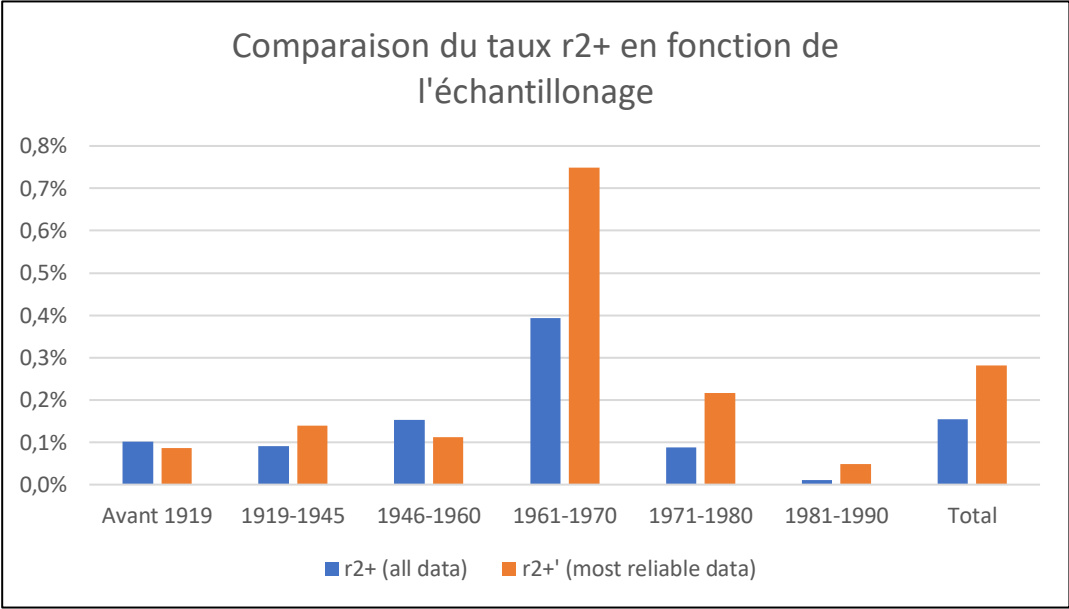


Annexe E



Annexe E

Annexe F – Comparaison du taux de rénovation efficace en fonction de l'échantillonnage



Annexe G – Extraction du cahier technique SIA 2031 pour les classes énergétiques

4.4 Indice normalisé de besoin de chauffage

Le besoin de chauffage du bâtiment Q_{Hr} , calculé avec l'utilisation standard selon SIA 380/1:2009, est divisé par la valeur limite $Q_{H,li}$ donnée par SIA 380/1:2009 pour le bâtiment étudié pour obtenir l'indice normalisé de besoin de chauffage $R_{H,2016}$:

$$R_{H,2016} = \frac{Q_{Hr}}{Q_{H,li}} \quad \text{avec} \quad \delta R_{H,2016} = R_{H,2016} \sqrt{\left(\frac{\delta Q_{Hr}}{Q_{Hr}}\right)^2 + \left(\frac{\delta Q_{H,li}}{Q_{H,li}}\right)^2} \quad (11)$$

4.5 Classes

- 4.5.1 Une classe est attribuée au bâtiment en fonction de son indice de consommation d'énergie primaire normalisé R , les limites de classes étant données dans le tableau 3. Suivant l'indice utilisé, la classe correspond à la consommation d'énergie primaire, aux besoins en chauffage ou à l'émission de gaz à effet de serre résultant de la consommation totale d'énergie primaire.

Tableau 3 Classes

Classe	R minimum %	R maximum %	Commentaire pour les classes énergétiques
+	< 0	0	Bâtiments à énergie positive
A	> 0	50	Bâtiments à très bonne performance
B	> 50	100	Bâtiments meilleurs que la référence
C	> 100	150	Bâtiments consommant plus que la référence. Analyse recommandée.
D	> 150	200	
E	> 200	250	
F	> 250	300	
G	> 300		Bâtiments nettement hors normes, méritant une analyse visant à des améliorations

Échelle de couleurs: + bleu ciel, A vert foncé, B vert clair, C vert-jaune, D jaune, E jaune-orangé, F orange, G rouge

- 4.5.2 Si l'intervalle $[R - \delta R; R + \delta R]$ défini selon 4.4 couvre plus d'une classe, il est recommandé d'acquiescer les données avec plus de précision et de refaire les calculs. À défaut, on attribue au bâtiment la classe correspondant à la valeur supérieure, à savoir $R + \delta R$.