



**HAL**  
open science

## Optimiser les stratégies de rénovation des bâtiments résidentiels à l'échelle territoriale : analyse des plans climats de différentes villes

Martin Rit, Enora Garreau, Mathieu Thorel, Jonathan Villot, Robin Girard

### ► To cite this version:

Martin Rit, Enora Garreau, Mathieu Thorel, Jonathan Villot, Robin Girard. Optimiser les stratégies de rénovation des bâtiments résidentiels à l'échelle territoriale : analyse des plans climats de différentes villes. IBPSA 2024, May 2024, La Rochelle - Ile d'Oléron, France. hal-04882430

**HAL Id: hal-04882430**

**<https://hal.science/hal-04882430v1>**

Submitted on 13 Jan 2025

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Optimiser les stratégies de rénovation des bâtiments résidentiels à l'échelle territoriale : analyse des plans climats de différentes villes

Martin Rit <sup>1,2,\*</sup>, Enora Garreau <sup>1</sup>, Mathieu Thorel <sup>1</sup>, Jonathan Villot <sup>2</sup>, Robin Girard <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 77420 Champs-sur-Marne

<sup>2</sup>Mines Saint-Etienne, UMR 5600 EVS, Institut Henri Fayol, Département GEO, F - 42023 Saint-Etienne, France

<sup>3</sup>Mines Paris – PSL, Centre Procédés, Energies Renouvelables et Systèmes Energétiques (PERSEE), 06904 Sophia-Antipolis

\* [martin.rit@cstb.fr](mailto:martin.rit@cstb.fr)

---

*RÉSUMÉ. Pour définir une stratégie de rénovation des bâtiments résidentiels, les décideurs politiques ont besoin de modèles qui soutiennent la prise de décisions grâce à une compréhension approfondie du parc bâti. Pour répondre à ce besoin, un modèle d'optimisation a été développé au sein du CSTB qui permet (1) d'informer les décideurs sur les contraintes et limites de rénovation de leur parc, (2) d'identifier de manière adaptée au contexte local des mesures d'économie d'énergie et de carbone (gestes de rénovation), et (3) d'identifier les écarts entre les stratégies actuellement planifiées et les stratégies réellement mises en œuvre. Dans cet article, plusieurs plans climats de différentes villes françaises sont analysés. La principale contribution de ces études est l'échelle géographique : tous les bâtiments résidentiels dans les zones d'intérêt ont été modélisés et simulés en utilisant des données nationales avant d'appliquer une réduction par clustering. L'algorithme d'optimisation est ensuite appliqué à ces bâtiments afin de choisir les gestes de rénovation à appliquer à chacun d'eux permettant d'atteindre les objectifs environnementaux identifiés, en tenant compte des contraintes applicables à chaque territoire (nombre de rénovations par an) et au niveau national (rénovation des passoires thermiques (DPE F&G)). En utilisant des études de plan climat de grandes métropoles françaises, cet article met en évidence un écart significatif entre les stratégies actuellement préconisées par les décideurs et celles proposées par notre modèle d'optimisation. Cette divergence peut s'expliquer notamment par l'écart entre mesures mises en place et objectifs à atteindre comme la relation entre la performance des rénovations et les objectifs climatiques réalisables.*

*MOTS-CLÉS. Rénovations des bâtiments résidentiels, Analyse de politiques publiques, Mixed Integer Linear Programming, échelle territoriale*

---

## 1. INTRODUCTION

En France, le secteur résidentiel contribue aux émissions de gaz à effet de serre à hauteur de 27% en émissions directes et indirectes et à 45% de la consommation d'énergie finale (Ministère de la transition écologique et solidaire, 2020), soulignant l'importance de la mise en œuvre de stratégies de rénovation efficaces. Cet article présente une approche novatrice basée sur des données open-source pour optimiser la rénovation de bâtiments résidentiels à une échelle territoriale. Pour cela, en combinant des bases de données ouvertes et des modèles de simulation et d'optimisation, l'objectif est de fournir une méthodologie transparente et reproductible qui aide les parties prenantes à prendre des décisions éclairées. La méthodologie se concentre sur la compréhension du stock de bâtiments existant, la simulation des demandes énergétiques annuelles et l'exploration du potentiel des techniques de clustering dans l'optimisation des stratégies de rénovation. Cette étude contribue non seulement à la compréhension académique de l'optimisation énergétique à l'échelle territoriale, mais offre également des aperçus pratiques

dans le contexte français, où de telles interventions sont nécessaires pour atteindre les objectifs climatiques nationaux et locaux.

La question de recherche qui guide cet article est : ”*Comment un outil d’optimisation peut-il aider et compléter une planification existante de la rénovation d’un parc de bâtiments ?*”.

De part l’état actuel des recherches en France, les contributions de cet article à la problématique scientifique sont (1) l’application d’une méthode d’optimisation multi-étapes avec clustering sur des métropoles françaises, (2) l’évaluation des spécificités et des défis de chaque métropole via l’analyse de leur plan climat et (3) l’analyse des implications des résultats pour les politiques de rénovation énergétique en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES).

## 2. MÉTHODOLOGIE

Le modèle d’optimisation a pour vocation à sélectionner les bâtiments à rénover selon certaines contraintes et objectif et à planifier dans le temps cette rénovation afin de proposer une ”trajectoire de décarbonation du parc”. C’est un modèle d’optimisation de type ”sac à dos”, au format MILP, codé en Pyomo et résolu avec le solveur Mosek. D’autres travaux développent des méthodes d’optimisation de rénovation à l’échelle de plusieurs bâtiments comme (Merlet et al., 2022) mais ces travaux ne considèrent pas une optimisation à l’échelle d’un parc de milliers de bâtiments et une comparaison à des plans nationaux existants.

### 2.1. REVUE DE L’ARBRE DE TRAJECTOIRE ET DU MODÈLE D’OPTIMISATION SHAPE

Cet aspect trajectoire dans la résolution du problème d’optimisation est pris en compte via des arbres de décision. Chaque poste de rénovation  $w \in W = \{mur, sol, plafond, fenêtre, chauffage, ventilation, ECS\}$  dispose d’un arbre de décision qui est indépendant des autres. Ainsi, pour un bâtiment donné et un élément de rénovation donné, avec 3 mesures de rénovation possibles (Inchangé, r1, r2) et pour une liste de deux ans, les trajectoires de rénovation pour un bâtiment sont représentées par le type d’arbre de décision montré dans la Figure 1 :

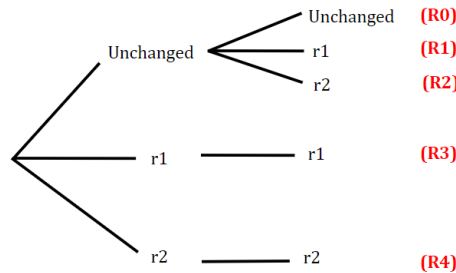


Figure 1 : Arbres de décision pour les trajectoires de rénovation

Le nombre de trajectoires est réduit à  $[(n_{r_w} - 1) \times n_y + 1]$  pour chaque poste de rénovation et chaque bâtiment, avec  $n_{r_w}$  le nombre de solutions de rénovation pour  $w$  et  $n_y$  le nombre d’années considérées. La combinatoire  $\mathbf{C}$  avec  $n_b$  le nombre de bâtiments s’écrit alors :

$$\mathbf{C} = n_b \times \prod_{w \in W} ((n_{r_w} - 1) \times n_y + 1) \quad (1)$$

La combinatoire appliquée aux données de rénovation et au modèle de simulation (Rit Martin, 2024) est résumée dans le Tableau 1. Cela justifie un algorithme d’optimisation pour résoudre

le problème proposé et nécessite de réduire au maximum la combinatoire. Le temps de simulation indiqué est calculé à partir du modèle de simulation linéaire type 3CL-DPE utilisé dans ces travaux (Rit Martin, ).

Tableau 1 : Comparaison de la combinatoire par bâtiment

Nombre de Périodes Temporelles	Combinatoire Polynomiale	Temps de calcul
2	$1.02.10^7$	5 jours
3	$1.67.10^8$	75 jours
4	$1.31.10^9$	1.6 ans
5	$6.70.10^9$	8 ans

## 2.2. DESCRIPTION RAPIDE DE L'OUTIL D'OPTIMISATION SHAPE

Le modèle optimise les choix de rénovation de l'ensemble du parc bâti selon la variable  $O$ , qui représente les paramètres physiques et économiques possibles. La variété des variables qui peuvent être utilisés comme cibles ou contraintes dans le modèle est listée dans le Tableau 2 :

Tableau 2 : Métriques optimisables ou contraignables  $O_{all}$

Métriques	Utilisation	Description
$O_{GES.12(3)}$	Optimisation ou contraintes	Émissions de GES en fonctionnement (et indirectes)
$O_{NPC}$	Optimisation ou contraintes	Coût Global
$O_{EC}$	Optimisation ou contraintes	Consommation d'énergie
$O_{PE}$	Contraintes	Pic électrique
$O_{class.DPE}$	Contraintes	Cible de classe DPE minimum
$O_{nb.reno}$	Contraintes	Nombre de rénovations réalisables par type

Plusieurs études se concentrent sur l'optimisation de la rénovation avec des variables de décision binaires utilisées pour implémenter des interventions du côté de la demande ou de l'offre, comme documenté dans (He et al., 2019). Cette formulation par des variables de décision binaires représente avec précision si le décideur opte pour une solution de rénovation ou non. Dans ce travail (A. Rogeau, 2020), les variables de décision binaires  $w$  (Équation 2, liée à l'ECS),  $x$  (Équation 3, liée au chauffage) et  $y$  (Équation 4, liée à la ventilation) représentent donc l'activation (1) ou non (0) des différentes technologies de rénovation. Les variables  $E_b$ ,  $K_b$  et  $R_b^s$  représentent les trajectoires pour l'ECS, le système de chauffage et l'isolation.

$$w_{b,E} \in \{0, 1\}, \quad b \in B, E \in E_b \quad (2)$$

$$x_{b,R,K} \in \{0, 1\}, \quad R \in R_b^s, K \in K_b \quad (3)$$

$$y_{b,V,K} \in \{0, 1\}, \quad b \in B, V \in V_b, K \in K_b \quad (4)$$

En tirant parti de la structure des fonctions identifiées ci-dessus, il est possible de décrire le modèle d'optimisation comme les équations suivantes 5 et 6, formulées comme une variante d'un problème de sac à dos (A. Rogeau, 2020) :

$$\text{minimiser} \quad \sum_{b \in B} \sum_{s \in S} \sum_{R \in R_b^s} \sum_{K \in K_b} x_{b,R,K} O^1, \quad O^1 \in O_{all} \quad (5)$$

$$\text{soumis à} \quad \sum_{b \in B} \sum_{s \in S} \sum_{R \in R_b^s} \sum_{K \in K_b} x_{b,R,K} O^2 \leq F_{0^2}, \quad O^2 \in O_{all} \quad (6)$$

L'équation 5 définit la fonction objectif du problème d'optimisation qui varie en fonction de la variable  $O^1$  choisie. Les contraintes dépendent des métriques  $O^2$  sélectionnées dans l'équation 6 et peuvent, par exemple, imposer une limite sur les émissions de GES du parc bâti après rénovation en choisissant  $O^2 = O_{GHG}$  et  $F_{O^2}$  un pourcentage de réduction à atteindre pour tout le territoire étudié. L'ensemble des règles métiers, des données de rénovation, d'énergie et le fonctionnement global du module d'optimisation MILP sont décrits dans (Rit Martin, 2024).

Pour résoudre de grands problèmes d'optimisation sur un grand nombre de bâtiments (plusieurs dizaines de milliers), les besoins mémoire et en temps de calcul de la machine qui réalise le calcul sont très élevés. Dans ce cas, une méthode de clustering est nécessaire pour réduire la complexité du problème. La méthode globale qui utilise le clustering hiérarchique ascendant peut se décrire en 3 étapes qui correspondent à (1) la mise en œuvre du clustering sur les données caractéristiques et de performance thermique du bâtiment, leur localisation et leur consommation énergétique (sélection des paramètres basés sur (Rivallain et al., 2019); (2) la prise en compte du médoïd (bâtiment réel représentant au mieux un cluster dans l'ensemble de données) et (3) l'optimisation des solutions de rénovation sur le parc de médoïd.

En prenant en considération le poids du cluster  $weight\_b$  d'un médoïd  $b$  (soit le nombre d'éléments qu'il contient), la fonction d'optimisation, telle que décrite dans l'Équation 5, est modifiée selon l'Équation 7.

$$\text{minimize } \sum_{b \in B} weight\_b \left( \sum_{s \in S\_b} \sum_{r \in R\_s} \sum_{h \in H\_b} x_{b,s,r,h} O^1 \right), O^1 \in O_{all} \quad (7)$$

### 3. ÉTUDE DE CAS : RÉSULTATS D'OPTIMISATION

L'objectif est de comparer et analyser les stratégies de rénovation avec celles existantes, en se concentrant sur les plans d'actions climatiques de Grenoble, Lille, Nantes, et Toulouse.

#### 3.1. PLANS CLIMAT-AIR-ÉNERGIE TERRITORIAUX (PCAET) ET MÉTHODOLOGIE

Les PCAET présentent une approche globale pour les collectivités territoriales pour lutter contre le changement climatique avec un volet pour le secteur résidentiel en visant la neutralité carbone en 2050 via la réduction des émissions de GES, les économies d'énergie et le développement des énergies renouvelables. Le modèle SHAPE est utilisé pour définir des scénarios de trajectoire de rénovation à 2050 atteignant la neutralité carbone tout en optimisant la rentabilité économique. La réalisation de ces trajectoires permettent d'évaluer diverses métriques en 2030 pour comparer aux scénarios du PCAET, comme illustré dans le Tableau 3.

Ce scénario pour la SNBC 2050 vise à réduire les émissions de GES et la consommation énergétique, avec un point de passage pour 2030. L'optimisation sera donc effectuée avec 4 contraintes différentes : une réduction des émissions de GES, un objectif de parc BBC, un nombre de rénovations annuel par gestes et une valeur seuil pour le pic électrique. Le nombre de rénovations annuel a été choisi pour refléter l'ambition gouvernementale de 700.000 rénovations annuelles en 2030 tout en considérant une montée en puissance du secteur. Une obligation de rénovation de l'enveloppe en une seule fois est également mise en place dans un soucis de réalité vis-à-vis du pas de temps de 10 ans.

Tableau 3 : Tableau des contraintes et objectifs

Métriques	Description
$O^1 = NPC$	Optimisation du coût global
$O_1^2 = O_{GES.12}$	Réduction des émissions de GES d'un facteur 10 par rapport à 2016
$O_2^2 = O_{EC.DPE}$	Consommation DPE pour obtenir un parc de bâtiments BBC : 80kWhEP.m2.an en moyenne sur le parc
$O_3^2 = O_{PE}$	< 110% du pic de puissance appelé actuel
$O_4^2 = O_{nb.reno}$	Nombre de rénovations (2020-2030) : 1% par an Nombre de rénovations (2030-2040) : 2,5% par an Nombre de rénovations (2040-2050) : 4% par an
$dy = 10$	L'arbre de décision sera construit pour les années 2020, 2030, 2040, et 2050

### 3.2. RÉSULTATS

La Figure 2 illustre la comparaison des consommations énergétiques en 2030 entre les objectifs PCAET et les résultats de l'optimisation. On remarque qu'à part pour Nantes, il y a un écart notable entre les objectifs de réduction de la consommation énergétique et les prévisions des PCAET, avec un effort demandé de 15 à 25% supérieur côté optimisation. Cela signifie que les PCAET ne sont pas assez ambitieux en 2030 pour atteindre la SNBC à moindre coût.

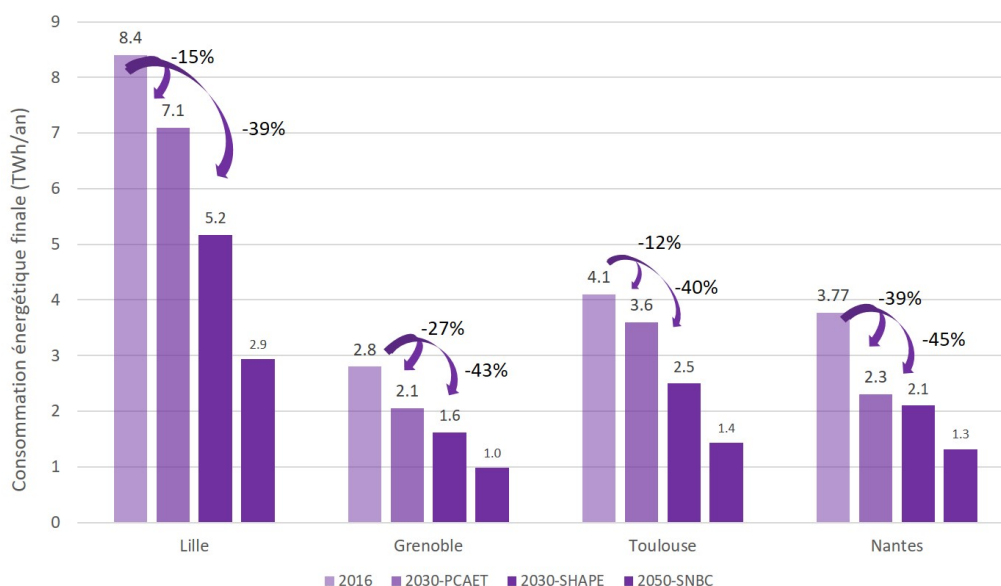


Figure 2 : Consommation énergie 2016, objectifs PCAET / résultats de SHAPE en 2030, SNBC en 2050

Les PCAET se concentrent sur la diminution de la consommation énergétique et des émissions de GES, sans pour autant détailler les stratégies de rénovation spécifiques. Le modèle présenté dans cet article offre la possibilité d'examiner les différentes options de rénovation pour chaque médoid permettant d'observer les changements de vecteurs énergétiques, ainsi que de suivre l'évolution des DPE (Rit Martin, 2024). Une comparaison des stratégies de rénovation est réalisée en Figure 3, définit de manière à illustrer les rénovations allant de celles impliquant de multiples interventions jusqu'aux rénovations monogestes.

On observe une tendance pour des rénovations plus complexes dans l'agglomération de Lille. Cette différence marquée dans le comportement du modèle peut s'expliquer par l'état actuel du parc bâti lillois ainsi que par le climat, qui nécessite une isolation plus poussée. Cette figure

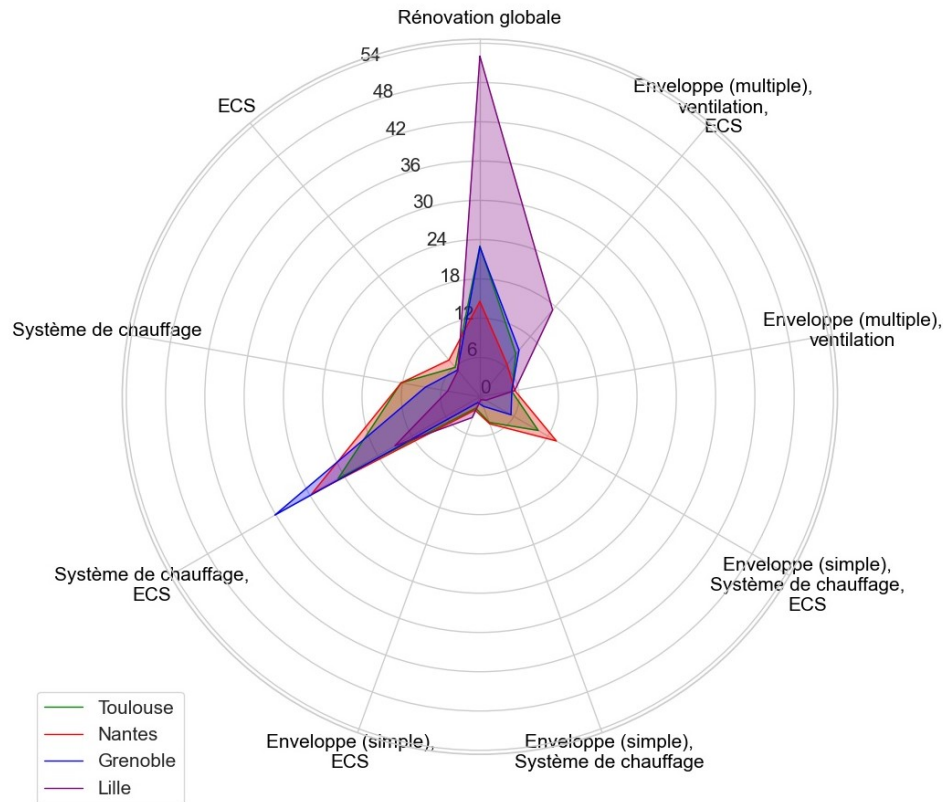


Figure 3 : Répartition des bouquets de travaux entre agglomérations (en % du total de rénovation)

illustre que, bien que le modèle suggère des approches similaires dans toutes les agglomérations pour réduire les émissions de GES, les proportions varient considérablement.

Ces différences de planification des gestes sur un même bâtiment sont visibles d'un point de vue temporel sur la Figure 4.

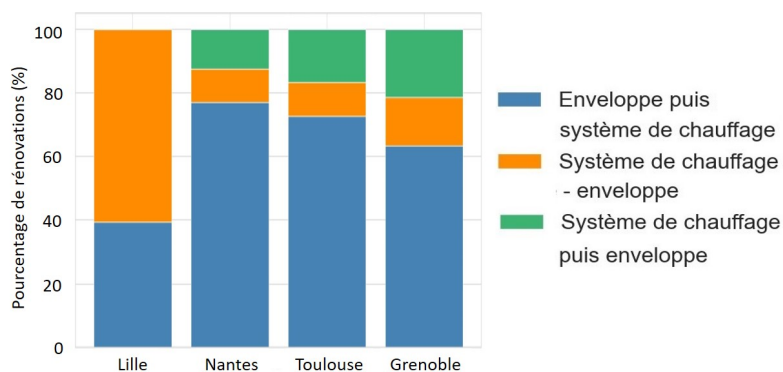


Figure 4 : Répartition temporelle des rénovations entre agglomérations (en % du total de rénovation)

À Lille, les rénovations de l'enveloppe et du système de chauffage sont majoritairement réalisées simultanément. À Nantes, Toulouse et Grenoble, la tendance est de rénover l'enveloppe avant le système de chauffage, permettant un meilleur dimensionnement et une efficacité accrue du système de chauffage.

Ce choix impacte le coût de rénovation du chauffage, comme décrit dans le modèle d'optimisation (Rit Martin, 2024), qui favorise donc la rénovation du chauffage après ou avec

l'isolation dû à un coût réduit d'un chauffage dimensionné correctement.

### 3.3. APPORTS COMPLÉMENTAIRES AU PCAET - EXEMPLE DE NANTES

L'étude effectuée permet des compléments d'informations par rapport au PCAET qui ne comporte pas de volets sur les évolutions technologiques ou énergétiques du parc bâti résidentiel. Cette section illustre les apports du modèle pour l'agglomération de Nantes.

La Figure 5 illustre l'évolution du parc bâti en termes de classes DPE. Ce graphique montre l'atteinte d'un parc classé BBC d'ici 2050 avec la rénovation de la totalité des passoires énergétiques.

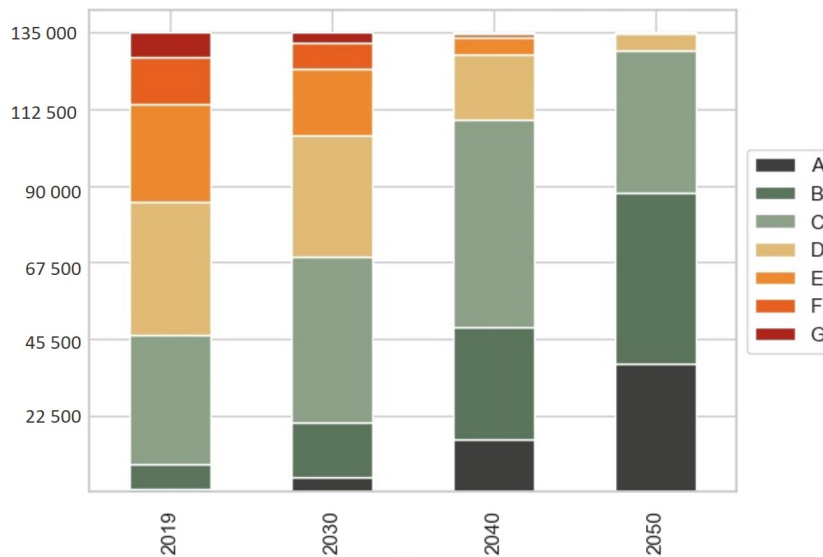


Figure 5 : Evolution classes DPE agglomération Nantes

La répartition des types de travaux de rénovation est représentée en Figure 6 avec 15% des rénovations globales (bleu foncé).

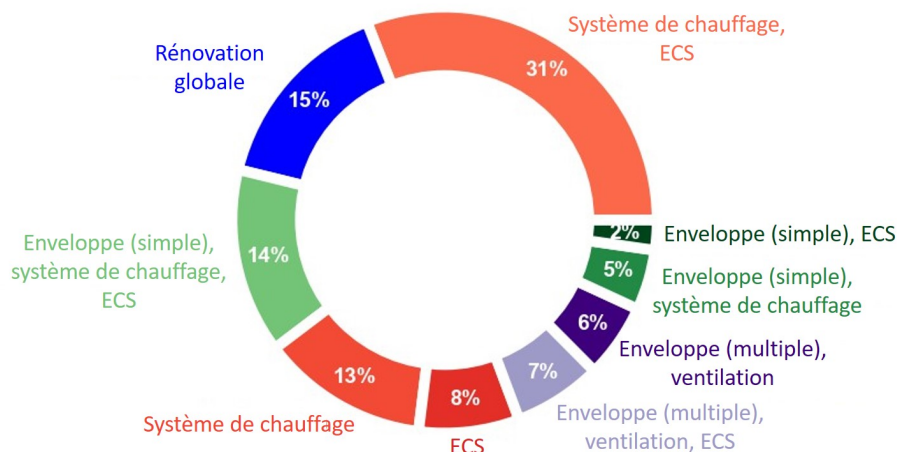


Figure 6 : Répartition des travaux de rénovation pour Nantes

En outre, 35% des travaux concernent des rénovations d'ampleur moyenne (en vert et violet), tandis que les 50% restants sont des améliorations ciblées sur le système de chauffage et l'ECS (en rouge). Cette stratification des travaux indique une approche adaptée aux spécificités de chaque bâtiment. L'accent mis sur la diversité des interventions de rénovation souligne le défi consistant à équilibrer les objectifs à long terme d'un parc bâti BBC avec les besoins immédiats de rénovation, garantissant une réponse adaptée aux exigences de chaque bâtiment.



#### 4. DISCUSSION

Le modèle proposé dans cette étude est améliorable sur divers points abordés dans ce paragraphe. Un test de robustesse du modèle vis-à-vis des incertitudes affectants les entrées du module comme le prix des énergies, le facteur d'émissions, les paramètres de l'optimisation (nombre de périodes temporelles, nombre de rénovations) est à réaliser. Cela peut permettre de proposer différentes trajectoires de rénovations en fonction des données initiales. Un des freins majeurs au déploiement de ce modèle à grande échelle reste le temps de calcul et les besoins de mémoires comme explicité dans (Rit Martin, 2024).

Divers développements sont envisagés pour améliorer la simulation énergétique. Parmi eux, la prise en compte du besoin de froid via une simulation linéaire basée sur les degrés heures d'utilisation représente une avancée significative. L'accessibilité à des bases de données caractérisant la présence de climatisation dans les bâtiments est aujourd'hui un frein à cette étude. Certaines pistes d'amélioration du modèle de simulation énergétique reposent sur l'ajout de paramètres spécifiques supplémentaires. Ainsi, la fin de vie des équipements de chauffage, d'ECS, de ventilation, ou d'isolation des bâtiments sont à considérer, mais la donnée de caractérisation de l'âge des équipements manque actuellement. Une prise en compte de la météo future est primordiale dans ces travaux et sera réalisé lorsque le modèle de simulation prendra en considération les besoins de froid.

#### 5. CONCLUSION

Les résultats de cette étude démontrent le potentiel d'une approche par optimisation pour la rénovation de bâtiments résidentiels à une échelle territoriale. En utilisant un modèle couplant la simulation et l'optimisation avec des techniques de clustering, ces travaux proposent une méthode transparente sur l'ensemble du territoire français. Les principaux résultats soulignent que les trajectoires de décarbonation ne sont pas assez ambitieuses en donnant l'illusion d'une accélération après 2030. Ce choix est démontré ici que ce n'est pas une solution optimale d'un point de vue économique. De plus, il serait souhaitable que les universitaires accompagnent les collectivités afin d'avoir plus de transparence pour ces enjeux sociétaux majeurs.

#### BIBLIOGRAPHIE

- A. Rogeau, R. Girard, Y. A. M. T. G. K. (2020). Joint optimization of building-envelope and heating-system retrofits at territory scale to enhance decision-aiding. *Applied Energy*.
- He, Y., Liao, N., Bi, J., and Guo, L. (2019). Investment decision-making optimization of energy efficiency retrofit measures in multiple buildings under financing budgetary restraint. *Journal of Cleaner Production*.
- Merlet, Y., Rouchier, S., Jay, A., Cellier, N., and Woloszyn, M. (2022). Integration of phasing on multi-objective optimization of building stock energy retrofit. *Energy and Buildings*, 257 :111776.
- Ministère de la transition écologique et solidaire (2020). Snbcbatiment. page 4.
- Rit Martin, Girard Robin, V. J. T. M. A. Y. Calibration method for an open source model to simulate building energy at territorial scale. *Energy and Buildings*.
- Rit Martin, Thomas Arthur, V. J. T. M. G. E. G. R. (2024). Shape : A temporal optimization model for residential buildings retrofit to discuss policy objectives. *Applied Energy*.
- Rivallain, M., Agapoff, S., Boisson, P., Fouquier, A., and Lee, Y. (2019). Clustering as a simplification tool for the decision-making process on building stock renovation.